



# **OIKOSULKUMOOTTOREIDEN LAAKERIVIRRAT**

Mittaus ja korjaavat toimenpiteet

Joni Järvi

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2014  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

JÄRVI, JONI:

Oikosulkumoottoreiden laakerivirrät  
Mittaus ja korjaavat toimenpiteet

Opinnäytetyö 76 sivua, joista liitteitä 25 sivua  
Toukokuu 2014

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda edellytykset UPM-Kymmene Oyj:n Tervasaaren tehtaalte taajuusmuuttajakäyttöisten oikosulkumoottoreiden laakerivirtojen mittaukseen ja niiden tulkitsemiseen. Lisäksi tarkoituksena oli kartoittaa paperikoneella laakerivirtojen kannalta ongelmallisia kohteita, ottaa niistä osa tarkasteluun ja hakea toimivia ratkaisuja laakerivirtojen pienentämiseksi.

Työhön sisältyi tarvittavien mittalaitteiden hankintasuunnitelmat ja -toteutus sekä niiden käytön opettelu. Koska tarkoituksena oli luoda tehtaalte edellytykset mittauksiin oman automaatiokunnossapidon voimin, työhön kuului myös ohjeistuksen laadinta mittauksiin ja tulosten tulkintaan sekä henkilöstön koulutusta aiheeseen. Lisäksi luotiin yhden paperikoneen linjakäyttöjen osalta seurantataulukko, johon voidaan kerätä mittausdata vähitellen kaikilta käytöiltä. Kun käyttöihin tehdään tulevaisuudessa muutoksia, voidaan kyseinen kohde mitata uudestaan ja todeta seurantataulukosta mahdolliset vaikutukset.

Koska yrityksessä on globaali toimintaympäristö, kuuluu yrityksen toimintatapoihin myös työvoiman lainaus muihin yksiköihin. UPM-Kymmene Oyj:n Kaipolan paperitehtaalte suoritettiin mittauksia erääseen kohteeseen, jossa ongelmia oli ilmennyt. Tulokset olivat varsin samankaltaisia kuin ulkopuolisen mittaaajan saamat tulokset. Tervasaaren yksikön henkilöstö voi jatkaa tällaista yksiköiden välistä toimintaa laakerivirtamittauksissa tulevaisuudessa.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Option of Electrical Power Engineering

JÄRVI, JONI:  
Bearing Currents in Induction Motors  
Measuring and Remedial Actions

Bachelor's thesis 76 pages, appendices 25 pages  
May 2014

---

The aim of this bachelor's thesis was to create requirements the bearing currents measure of variable frequency drive induction motors and their interpreting for UPM-Kymmene Ltd Tervasaari factory. Furthermore, the purpose was to survey problematic objects for paper machine's bearing currents, as well as to examine part of them and to search for functional solutions to reduce bearing currents.

The procurement plans, implementations of the necessary measurement equipment and learning how to use them were included in the thesis. Because the purpose was to create requirements for the factory's own automation maintenance, the thesis included creating instructions for measurements and interpretation of outcomes as well as the personnel's training for the subject. Furthermore a monitoring table for one Paper Machine's multi drive system was created, which can be used for collecting data from every drive gradually. When the drives are changed in the future, the drive in question can be measured again and note possible effects can be found in the measurement table.

Because UPM-Kymmene Ltd has a global operational environment, the company's procedure also includes workforce's lending to other units. The measurements in one target of UPM-Kymmene Ltd Kaipola paper factory, where problems had been appearing, were performed. The results were quite similar to given results by a subcontractor. This kind of operation between units in bearing current measurements can be continued in the future by the personnel in Tervasaari unit.

---

Key words: induction motor, bearing current, variable frequency drive

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	LAAKERIVIRTAILMIÖ .....	8
2.1	Syntymekanismi.....	8
2.1.1	Yhteismuotoinen jännite .....	8
2.1.2	Hajakapasitanssit .....	9
2.2	Laakerivirtatyypit.....	11
2.2.1	EDM -laakerivirta.....	11
2.2.2	Akselin maadoitusvirta .....	12
2.2.3	Kapasitiivinen purkausvirta.....	13
2.2.4	Kiertovirta .....	14
2.3	Mittausmenetelmät.....	14
3	MITTAUSKOHTEET .....	17
3.1	2B ryhmän käyttö.....	17
3.1.1	Kohteen historia.....	17
3.2	Keskitelan käyttö.....	19
3.2.1	Kohteen historia.....	20
4	LAAKERIVIRTOJEN KENTTÄMITTAUKSET.....	26
4.1	Mittalaitteiden hankintaprosessi .....	26
4.1.1	Tarvesuunnittelu .....	26
4.1.2	Tarjouspyynnöt.....	26
4.2	Mittaustulokset.....	28
4.2.1	2B ryhmän käyttö .....	29
4.2.2	Keskitelan A käyttö .....	32
5	KORJAAVAT TOIMENPITEET .....	36
5.1	Korjaustavat.....	36
5.2	Toimenpiteet 2B ryhmään .....	39
5.2.1	Toimenpiteiden vaikutus.....	40
5.2.2	Yhteen veto 2B-ryhmästä.....	42
5.3	Toimenpiteet keskitela A-käyttöön.....	43
5.3.1	Toimenpiteiden vaikutus.....	45
5.3.2	Yhteen veto keskitela A-käytöstä.....	46
5.4	Kustannussäästölaskelma .....	47
6	POHDINTA .....	49
	LÄHTEET .....	50
	LIITTEET.....	52
	Liite 1. Laakerivirtojen mittausohje .....	52

Liite 2. Laakerivirtojen mittauspöytäkirja .....	63
Liite 3. Mittausraportti Kaipola PK4 keskitelan käytöstä .....	64

**LYHENTEET JA TERMIT**

CMC	yhteismuotoinen virta (common mode current)
CMF	yhteismuotoisen jännitteen suodatus (common mode filtering)
DC	tasajännite (direct current)
$du/dt$ arvo	jännitteen muutosnopeus
D-pää	oikosulkumoottorin ulostuloakselin pää
EDM	kipinätyöstö (electrical discharge machining)
IGBT	eristehilabipolaaritransistori (insulated gate bipolar transistor)
N-pää	oikosulkumoottorin tuulettimen pää
PK	paperikone
PWM	pulssinleveysmodulaatio (pulse width modulation)
RMS-arvo	tehollisarvo (root mean square)

## 1 JOHDANTO

Laakerivirran, eli vuotovirran aiheuttamat laakerivauriot sähkömoottoreissa sekä vaihteistoissa ovat yleistyneet teollisuudessa viime vuosina taajuusmuuttajakäyttöjen yleistyttyä. Taajuusmuuttajat tuottavat toimintansa takia yhteismuotoisen jännitteen kolmivaihejärjestelmän tähtipisteeseen ja tätä kautta aiheuttavat oikosulkumoottorin runkoon jännitteen, joka voi muodostaa suljetun virtapiirin moottorin laakerien kautta. (ABB 2000, 5.) Laakerivirtailmiö tunnettiin kuitenkin heti oikosulkumoottorin alkuajoista lähtien, joka johtui koneen magneettisesta epäsymmetriasta. Nykyisten tarkkojen valmistusmenetelmien ja pienien toleranssien ansiosta laakerivirtoja ei aiheudu tätä kautta. (PSK 7708 2004, 1.)

Laakerin läpi kulkeva virta aiheuttaa kipinöintiä laakerikehien ja rullien tai kuulien välissä, kun rasvakalvon läpilyöntilujuus ylittyy. Tämä puolestaan sulattaa metallia suuren virrantiheyden takia ja tekee tätä kautta laakerin kehään epätasaisuutta, joka alkaa kertaantua mekaanisen työstön takia. Laakerin käyttöikä lyhenee merkittävästi tästä syystä.

Laakerivirtojen syntymisen estämiseksi on kuitenkin olemassa useita keinoja, mutta koska laakerivirran tyyppejä on erilaisia, täytyy ensiksi selvittää minkä tyyppinen laakerivirta on kyseessä, ennen kuin ryhdytään mihinkään toimenpiteisiin. Tietyissä tapauksissa joku yleisesti käytetty toimenpide voi jopa pahentaa ongelmaa.

Laakerivirtojen mittaaminen on jo itsessään haasteellista ja mittalaitteet melko arvokkaita. Kuitenkin oikealla tuloksien tulkinnalla ja korjaavilla toimenpiteillä voidaan laakerivirtojen aiheuttamia ongelmia pienentää huomattavasti tai poistaa kokonaan. Suurien komponenttien ollessa kyseessä saadaan helposti huomattavia säästöjä sekä huoltokustannuksissa, että seisokkiajan lyhentämisessä.

## 2 LAAKERIVIRTAILMIÖ

### 2.1 Syntymekanismi

Laakerivirran syntymekanismi liittyy aina moottorin magneettiseen epäsymmetriaan. Tämä johtui aiemmin moottoreiden epätarkemmista valmistusmenetelmistä. Vaihekäämien keskinäisen epäsymmetrian tai roottorin epäkeskeisyyden vuoksi koneeseen jäi syöttötaajuinen jäännösvuo, joka kiersi staattoriselässä (PSK 7708 2004, 1).

Nykyisin moottorit valmistetaan kuitenkin niin tarkkoilla toleransseilla, ettei tällaista ilmiötä esiinny. Ongelman ovat muodostaneet varsin yleisesti teollisuudessa käytettävät taajuusmuuttajat. Taajuusmuuttajalla säädetään oikosulkumoottorin pyörintänopeutta portaattomasti muuttamalla moottorin syöttötaajuutta.

#### 2.1.1 Yhteismuotoinen jännite

Edelleen yleisin taajuusmuuttajatyyppe on kahdella DC- jännitetasolla varustettu taajuusmuuttaja. Perinteisesti kolmivaiheinen vaihtojännite muodostetaan PWM tekniikalla kytkemällä vuoroin + ja – jännitetasoja lähtöön. Tällöin kolmen vaiheen jännitteiden vektorisumma on nolla vain hyvin lyhyen hetken. Sinimuotoisella jännitteellä summa on koko ajan nolla. Jännitteiden summa kaksitasoisella taajuusmuuttajalla muodostuu kuvion 1 mukaiseksi neutraalijännitteeksi, eli yhteismuotoiseksi jännitteeksi. Kuviossa kolme ylintä käyrää ovat vaihtosuuntaajan vaihejännitteet ajan funktiona ja viimeisenä näiden summa, eli yhteismuotoinen jännite. Yhteismuotoinen jännite voidaan laskea kaikkien kolmen vaiheen vektorisummana kaavalla 1 (Ahola 2011, 19).

$$V_{yhteis} = \frac{\overline{V_u} + \overline{V_v} + \overline{V_w}}{3} \quad (1)$$

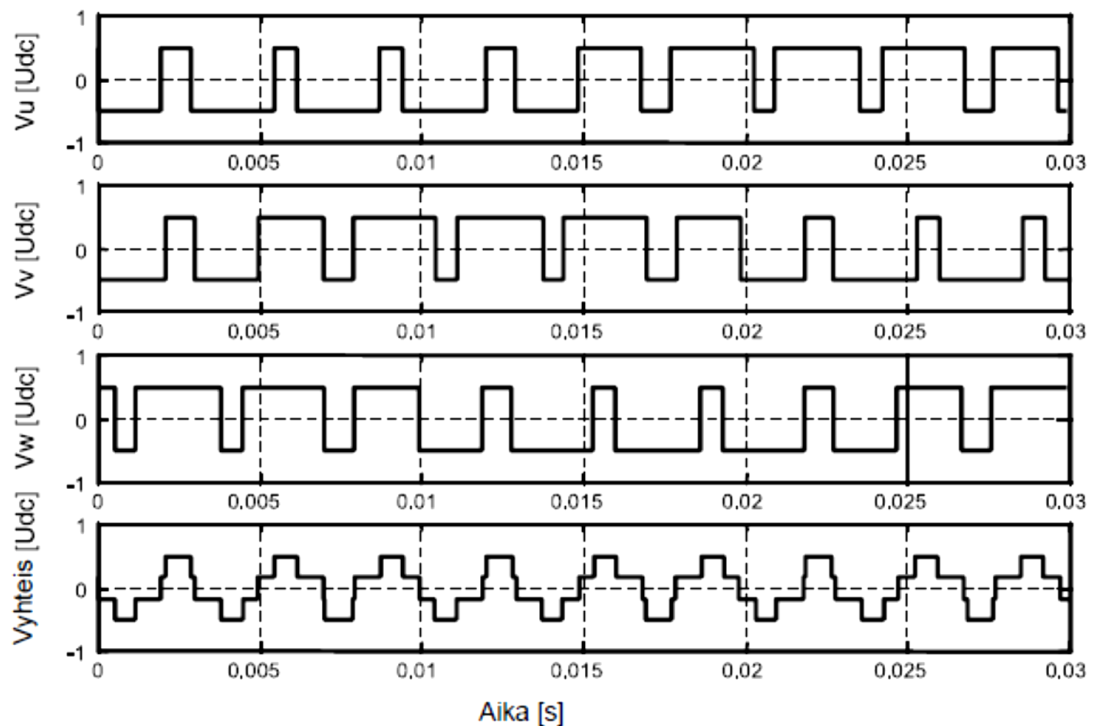
,jossa

$\overline{V_u}$  = vaiheen U jännite

$\overline{V_v}$  = vaiheen V jännite

$\overline{V_w}$  = vaiheen W jännite





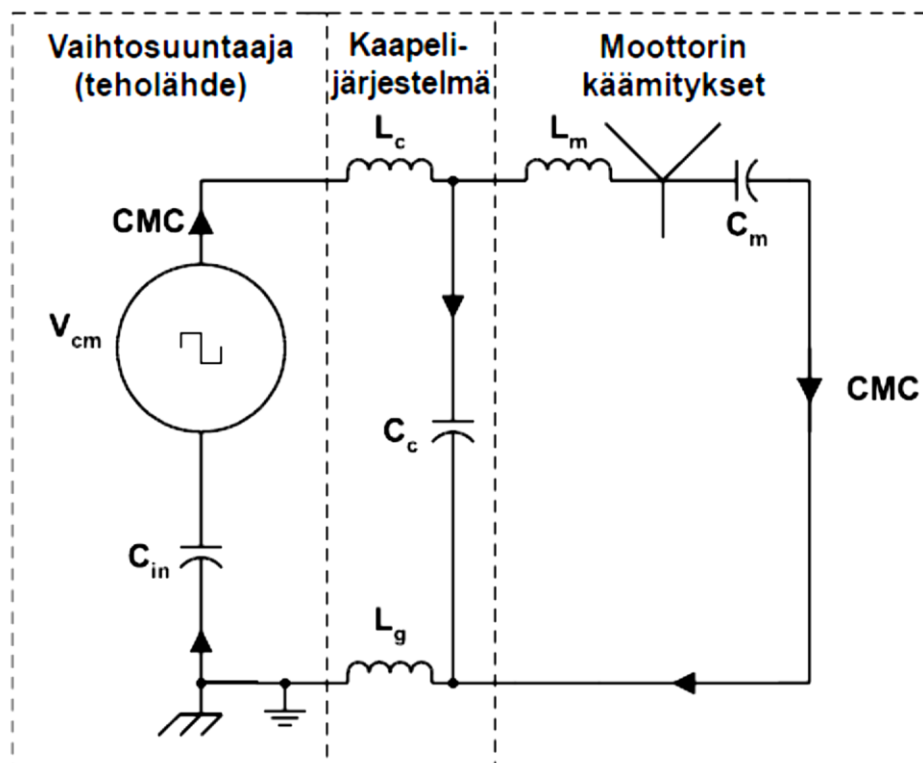
KUVIO 1. Kolmivaiheisen pulssinleveysmoduloidun taajuusmuuttajan vaihejännitteet ja niiden muodostama neutraali-jännite, eli yhteismuotoinen jännite (ABB 2000, 8).

Tämä yhteismuotoinen jännite muodostuu moottorin käämityksen tähtipisteeseen. Jännite on yleensä hyvin korkeataajuinen. Siemensin valmistamissa Sinamics- sarjan taajuusmuuttajissa pulssitaajuus on 1,25 kHz tehdasasetuksena (Siemens 2013, 23). Yhteismuotoinen jännite sisältää kuitenkin huomattavasti korkeampia taajuuksia kytkinkomponenttien erittäin nopean kytkennän vuoksi. Nykyisin yleisesti taajuusmuuttajissa käytetty kytkinkomponentti on suuritehoinen bipolaaritransistori, eli IGBT-transistori (Laughton & Warne 2003, 660). Päällekytketymisaika IGBT-komponentilla on alle 100 ns, joka aiheuttaa 10 MHz taajuuskomponentin (Laughton & Warne 2003, 595).

### 2.1.2 Hajakapasitanssit

Kapasitanssi syntyy aina, kun kaksi johtavaa materiaalia on eristetty toisistaan jollain eristeaineella, jonka läpilyöntikestoisuus ei ylitä käytetyllä jännitteellä (ABB 2000, 9). Järjestelmän kapasitanssi riippuu johtavien materiaalien muodosta, koosta, etäisyydestä sekä eristeaineen permittiivisyydestä (ABB 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita, 66). Oikosulkumoottorikäytössä esiintyy kapasitansseja useassa paikassa. Kapasitanssi muodos-

tuu syöttökaapelin vaihejohtimen ja PVC-eristeellä erotetun PE-johtimen välille. Moottorin rungosta eristetty käämitys muodostaa pienen kapasitanssin. Nämä kapasitanssiarvot ovat hyvin pieniä, eli niissä on pienillä taajuuksilla suuri impedanssi. Kuitenkin yhteismuotoisen jännitteen taajuuden ollessa erittäin korkea, muodostuu kapasitanssien kautta pieni-impedanssinen reitti yhteismuotoiselle virralle. (ABB 2000, 9.) Kuviossa 2 on esitetty yksinkertainen malli järjestelmän induktanssien ja kapasitanssien vaikutuksesta yhteismuotoisen virran, CMC, kannalta. Vaihtosuuntaaja tuottaa yhteismuotoisen virran, joka kulkee syöttökaapeloinnin induktanssien  $L_c$  ja moottorin käämi-induktanssien  $L_m$  kautta moottorin tähtipisteeseen. Virta jatkaa tähtipisteestä moottorin hajakapasitanssien  $C_m$  kautta moottorin runkoon. Rungosta virta päättyy laitoksen maadoitusjärjestelmän  $L_c$  kautta takaisin vaihtosuuntaajan runkoon, josta se puolestaan päättyy takaisin yhteismuotoisen virran lähteeseen vaihtosuuntaajan ja sen rungon kapasitanssin  $C_{in}$  kautta. Virralla on lisäksi toinen reitti kaapelien kapasitanssin  $C_c$  kautta. Tämä virta osaltaan nostaa moottorin rungon potentiaalia maadoitusjärjestelmän induktanssin  $L_g$  takia.



KUVIO 2. Taajuusmuuttajan ja oikosulkumoottorin yhteismuotoisen jännitteen virtapiiri (ABB 2000, 9).

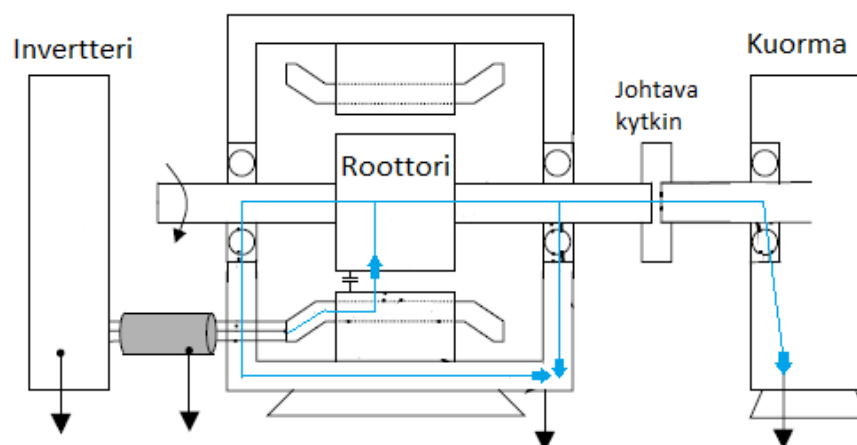
## 2.2 Laakerivirtatyypit

Laakerivirtoja esiintyy tyypillisesti neljässä eri muodossa. Näiden muodostumismekanismi eroaa toisistaan, mutta kaikkiin liittyy taajuusmuuttajan muodostama yhteismuotoinen jännite. (Lumia 2013, 9.). Laakerivirtojen neljä päätyyppiä ovat:

- EDM -laakerivirta (Electrical Discharge Machining)
- akselin maadoitusvirta
- kapasitiivinen purkausvirta
- kiertovirta

### 2.2.1 EDM -laakerivirta

Koska koneen roottorin ja staattorin, sekä laakerin kehien välillä on kapasitanssia, nousee roottorin jännite korkeataajuisen yhteismuotoisen jännitteen takia. Roottorin jännitettä kutsutaan akselijännitteeksi. Kun tämä jännite nousee riittävän suureksi, ylittyy koneen laakerien rasvakalvon läpilyöntikestoisuus ja energia purkautuu koneen runkoon aiheuttaen kipinätyöstöä laakerin osissa. (Ahola 2011, 19). Energia voi purkautua myös maapotentiaaliin kuormakoneen laakereiden tai hammasryntöjen kautta ja vahingoittaa niitä. Kuviossa 3 on esitelty mahdolliset EDM – laakerivirran reitit yksinkertaistaen kuormakone vain yhdellä laakerilla varustetuksi.



KUVIO 3. EDM –laakerivirran mahdolliset kulkureitit (Michigan Air 2002, 2. Muokattu).

Moottorin akselijännite riippuu syöttöjännitteiden summasta, eli yhteismuotoisesta jännitteestä, sekä moottorin kapasitansseista. Akselijännite  $U_s$  voidaan laskea kaavalla 2, mikäli kunkin vaiheen käämitysten ja roottorin välinen kapasitanssi on sama (University of Zagreb, 1).

$$U_s = (\overline{U_{L1}} + \overline{U_{L2}} + \overline{U_{L3}}) \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

,jossa

$\overline{U_L}$  = moottorin syöttöjännite vektorisuureena

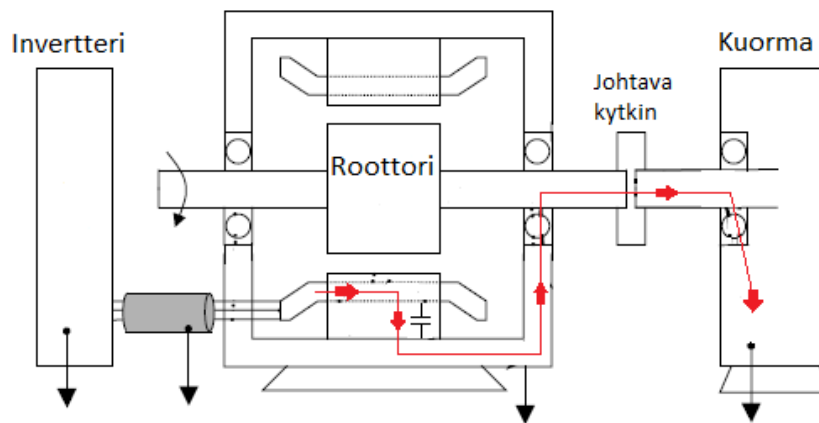
$C_1$  = staattorin käämityksen ja roottorin välinen kapasitanssi

$C_2$  = roottorin ja staattorin välinen kapasitanssi

Tyypillisesti kapasitanssi  $C_2$  on noin 50 kertainen kapasitanssiin  $C_1$  verrattuna. Mikäli jokaisen syöttöjännitteen suuruus on sama ja niiden välinen kulma on  $120^\circ$ , ei akselijännitettä synny lainkaan. (University of Zagreb, 1).

### 2.2.2 Akselin maadoitusvirta

Akselia pitkin maadoittuva virta voi syntyä, kun moottorin rungon impedanssi yhteismuotoisen virran lähteeseen on suurempi, kuin kuormakoneen vastaava impedanssi (Särkimäki 2009, 21). Tämän kaltainen tilanne syntyy helposti, jos moottorin runko on maadoitettu vain syöttökaapeleiden maadoitusjohtimilla ja kuormakoneena on vaihdelaatikko tukevassa ja hyvin raudoitettussa jalustassa. Virta kulkee sekä moottorin laakerin läpi, että mahdollisesti kuormakoneen laakerin läpi vaurioittaen näitä. Virta voi kulkea myös esimerkiksi vaihdelaatikon hammasrynnön läpi, jolloin hammastukset voivat vikaantua enenaikaisesti (Lumia 2013, 11). Kuviossa 4 on esitetty akselin maadoitusvirran kulureitti. Akselin maadoitusvirta syntyy moottorin rungon potentiaalin noustessa jännitteen suuren  $du/dt$  arvon takia (Särkimäki 2009, 21).

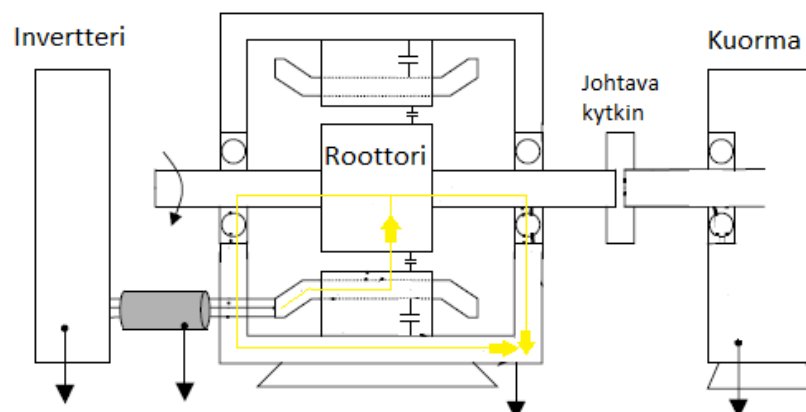


KUVIO 4. Akselin maadoitusvirran kulkureitti (Michigan Air 2002, 2. Muokattu).

### 2.2.3 Kapasitiivinen purkausvirta

Korkea yhteismuotoisen jännitteen  $du/dt$  arvo saa aikaan korkeataajuisia virtoja, jotka kulkevat kapasitiivisesti staattorin käämityksestä roottoriin ja laakereiden kautta koneen runkoon (Särkimäki 2009, 18). Koska virta kulkee kapasitiivisesti, se ei aiheuta kipinöintiä laakerin vierintäpinnoilla (Lumia 2013, 13). Virta on tyypillisesti myös hyvin pieni, luokkaa 5 – 10 mA (Särkimäki 2009, 19). Kuviossa 5 on esitetty kapasitiivisen purkausvirran mahdolliset kulkureitit moottorikäytössä.

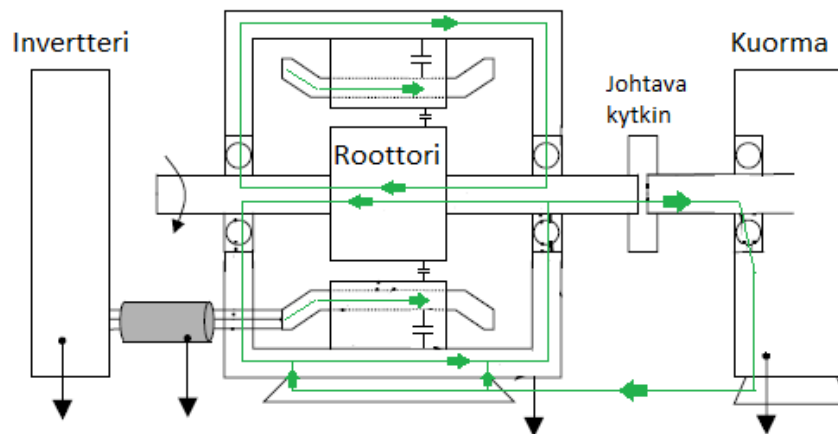
Yhteismuotoisen jännitteen  $du/dt$  arvo voi olla taajuusmuuttajakäytössä erittäin suuri, käytännössä jopa lähellä vaihtosuuntaajan IGBT-komponentin kytkentänopeutta. Jos taajuusmuuttajan syöttöjännite on suurempi kuin 400 V suositellaan käytettäväksi  $du/dt$  suodatinta (Siemens 2013, 141).



KUVIO 5. Kapasitiivisen purkausvirran mahdolliset kulkureitit (Michigan Air 2002, 2. Muokattu).

### 2.2.4 Kiertovirta

Kiertovirran syntymekanismi on monimutkaisempi, kuin muiden laakerivirtatyyppejen. Vaihtosuuntaajan kytkinkomponentin kytkentätilanne aiheuttaa yhteismuotoisen jännitteen muutoksen moottorin tähtipisteessä. Koska moottorin käämityksen ja rungon välillä on kapasitanssi, muodostuu yhteismuotoisen jännitteen muutoksen seurauksena koneen pituussuunnassa rungossa etenevä virtapulssi. (Ahola 2011, 20). Pituussuunnassa etenevä virtapulssi muodostaa magneettikentän roottorin ympärille. Tämän vaikutuksesta roottorin eri päiden välille syntyy jännite-ero. Mikäli jännite-ero on riittävän suuri, syntyy moottorin sisällä laakereiden kautta kiertävä virta. (Särkimäki 2009, 20). Kuviossa 6 on esitetty kiertovirran mahdolliset kulkureitit.

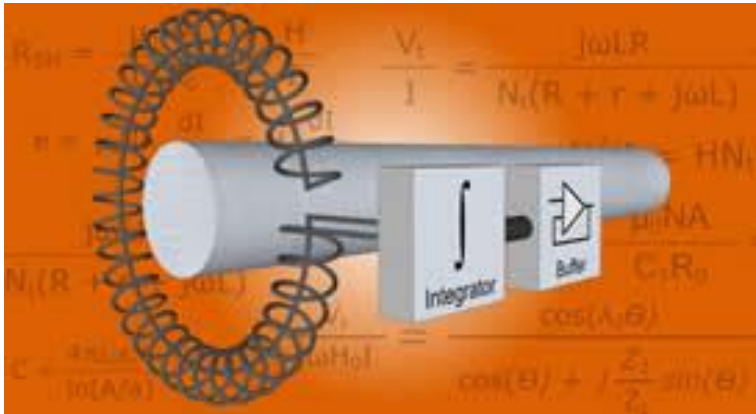


KUVIO 6. Kiertovirran mahdolliset kulkureitit (Michigan Air 2002, 2. Muokattu).

### 2.3 Mittausmenetelmät

Laakerivirtojen selvityksessä perinteiset mittauskeinot ovat moottorin akselijännitteen mittaaminen ja erinäisten virtojen mittaaminen käyttökohteesta. Mitattavia virtoja ovat summavirta moottorin syöttökaapeleista, maadoitusvirta moottorin maadoituksesta ja mahdollisesta lisämaadoituksesta, roottorista kuormalaitteeseen menevä virta, eli akselin maadoitusvirta ja akselista moottorin runkoon menevä virta, eli kiertovirta. Tervasaaren automaatiokunnossapidon käyttöön laadittiin erillinen laakerivirtojen mittausohje. Ohje on esitetty liitteessä 1. Moottoreiden laakerivirrat sisältävät tyypillisesti laajan spektrin taajuuksia hyvin korkeisiin, useiden megahertsien taajuuksiin asti (Särkimäki 2009, 20). Tämä asettaa omat vaatimuksensa mittalaitteille.

Käytetyin mittalaite laakerivirtojen mittaukseen on **Rogowski** -tyyppinen kela. Tiedemies Walter Rogowskin mukaan nimetty kela mittaa lävitseen kulkevasta virrasta vain vaihtojännitekomponentin ja kaistanleveys saadaan hyvin suureksi, luokkaa 1 Hz...16 MHz. (Power Electronic Measurements Ltd 2013.)



KUVIO 7. Rogowskin kelan periaatteellinen rakenne (Power Electronic Measurements Ltd 2013).

Kuten kuvio 7 nähdään, kela koostuu yhdestä suorasta johtimesta, jonka ympärille on kierretty toinen johdin. Kelan läpi menevässä johtimessa tapahtuva virran muutos aiheuttaa jännitteen Rogowskin kelan johtimien välille. Tämä jännite muutetaan elektronisella integraattorilla vastaamaan kelan läpi menevän johtimen virtaa. Rogowskin kela ei sisällä magneettisia materiaaleja, joten se ei kyllästy. Tämän johdosta sillä voidaan mitata myös huomattavan suuria, useiden kiloampeereiden virtoja.

Rogowskin kelan virtatietoa voidaan tulkita tarkoitukseen soveltuvalla oskilloskoopilla. Oskilloskoopin hankinnassa on tärkeää, että laitteen kaistanleveys ja näytteenottotaajuus ovat riittäviä. Kaistanleveys on taajuus, jolla siniaallon amplitudi on vaimentunut -3 dB. Alle 2 % virhe saavutetaan viisinkertaisella kaistanleveydellä mitattavan signaalin taajuuteen nähden. (MIKES-Aalto mittaustekniikka, 10).

Näytteenottotaajuus koskee vain digitaalisia oskilloskooppeja, joskaan analogisia malleja ei enää juuri ole markkinoilla. Näytenopeus määritellään näytteinä sekunnissa, samples per second, S/s. Käytännössä näytenopeus tulisi olla kymmenkertainen mitattavan signaalin taajuuteen nähden. Interpolaatiota hyödyntäessä näytenopeus voi olla pienempikin. (MIKES-Aalto mittaustekniikka, 10).

Laakerivirtamittauksissa suurimmat mitattavat taajuudet ovat muutaman megahertsin luokkaa. Noin 5 megahertsin taajuuksia tulee pystyä tulkitsemaan vaivatta oskilloskoppilla. Tämä ei ole nykyisille laitteille korkea taajuus, joten valikoimaa löytyy melko edullisestikin.



### 3 MITTAUSKOHTEET

#### 3.1 2B ryhmän käyttö

Tämän opinnäytetyöraportin ensimmäisessä osuudessa perehdytään erään paperikoneen etukuivatusosan 2B ryhmän käyttöön. Kohteen moottori on Siemens 1LA8317-6P yksikäänimoottori. Moottorin teho on 250 kW, jännite 500 V ja nimelliskierrosnopeus 1000 rpm. Moottorin laakereina on D-päässä 6218 C3 urakuulalaakeri ja NU218 ECP lieriörullalaakeri. Laakerointina N-päässä on NU 218 ECP lieriörullalaakeri ja N-pään laakerikilpi on sähköisesti eristetty. Moottoria syöttävä vaihtosuuntaaja on Siemens Simovert Masterdrive 6SE7035-7UK20. Moottorikaapelointi on toteutettu 2x(3x185/57) AMCCMK voimakaapelilla.

Kohteessa ei ole erillistä vaihdelaatikkoa, vaan energia tuodaan moottorilta kytkimen kautta kardaniakselilla kuivatusosan runkoon. Rungossa sisällä on alennusvaihteisto, joka pyörittää höyrysylinteriryhmää, johon kuuluu kaksi kuivatussylinteriä.

##### 3.1.1 Kohteen historia

Kohteeseen oli tehty moottorin petimuutos sahaamalla vanha peti irti ja valamalla uusi peti tilalle vuonna 2006. Tämän jälkeen moottorin värähtelytasot nousivat jyrkästi kuvion 1 mukaisesti. Moottori vaihdettiin ensimmäisen kerran alle vuoden päästä petimuutoksesta, vuoden 2007 alussa kuviossa 1 merkittynä ajankohtana 1. Toisen kerran moottori vaihdettiin lokakuussa 2008 ajankohtana 2. Kolmannen kerran moottori vaihdettiin kesäkuussa 2010. Tässä yhteydessä päätettiin tehdä korjaavia toimenpiteitä käyttöön, joten kohteeseen toteutettiin 10.8.2010 seuraavat toimenpiteet:

- Moottorin akselille asennettiin kuparinen maadoitushiili
- Moottori maadoitettiin kytkentäkotelostaan ja rungostaan vaihtosuuntaajan PE-pisteeseen 120 mm<sup>2</sup> pyöreällä kuparikaapelilla

Kuitenkin värähtelytasot lähtivät muutoksista huolimatta nousuun ja moottori vaihdettiin reilun vuoden päästä marraskuussa 2011. On mahdollista, että laakeri kului virrasta jo

kahden kuukauden aikana, minkä moottori oli ilman hiiltä ja maadoituksia. Näin ollen laakeria ei voitu enää pelastaa, vaan se lähti tuhoutumaan itseksensä. Tätä tukee hieman myös se, että seuraavat värähtelytasot ovat nousseet jo huomattavasti loivemmin ja moottori onkin tätä kirjoittaessa lokakuussa 2013 kestänyt jo 2 vuotta. Laakerivaurioiden epäiltiin värähtelyspektrin perusteella johtuvan virrasta. Lisäksi näin nopealle laakerien tuhoutumiselle ei löydy muuta järkevää syytä. Siemens lupaa vaaka-asennettujen, ilman ylimääräistä aksiaalikuormaa käyvien moottoreiden laakereiden käyttöiäksi vähintään 40 000 tuntia (Siemens 2008, 68). Laakerien vähimmäiskäyttöikä vuosina lasketaan kaavalla 3.

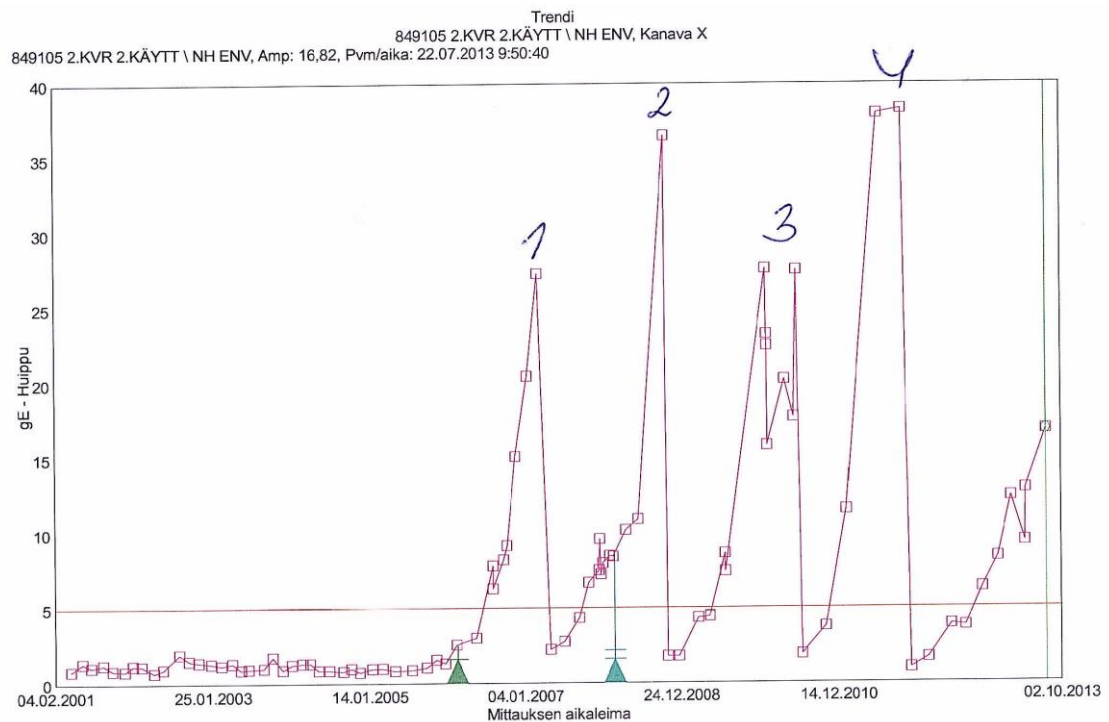
$$a = \frac{40\,000\text{ h}}{8760\text{ h} \cdot k} \quad (3)$$

jossa  $k$  = käyttöaikakerroin

Oletetaan käyttöaikakertoimen olevan paperikoneella 0,9. Tätä ei voida katsoa suoraan paperikoneen seisokkiajasta, koska käytöt pyörivät joka seisokin aikana useita tunteja. Tällöin moottorin laakerien vähimmäiskäyttöiäksi muodostuu.

$$a = \frac{40\,000\text{ h}}{8760\text{ h} \cdot 0,9} = 5,07\text{ vuotta}$$

Kuitenkin kuviosta 8 havaitaan, että moottori on vaihdettu alle 2 vuoden välein. Samalla nähdään, että moottori on käynyt vuodesta 2001 vuoden 2005 loppuun värähtelytasojen nousematta lainkaan. Näiden asioiden valossa voidaan todeta, että moottorin laakerien tuhoutuminen on johduttava laakerien läpi kulkevasta virrasta. Värähtelytasot eivät vielä ole hälyttävää luokkaa, mutta moottori todennäköisesti vaihdetaan lähitulevaisuudessa. Ongelma ei siis välttämättä poistunut hiilen asentamisella D-päähän ja minun tehtäväni oli jatkaa tästä asian selvitystä.



KUVIO 8. 2B ryhmän moottorin värähtelytasotrendi 12 vuoden ajalta.

### 3.2 Keskitelan käyttö

Toisena mittauskohteena oli erään paperikoneen suurin linjakäyttö, keskitelan käyttö. Kohteessa on 2 kpl Siemensin 1LA4562-6L kaksikäännotmoottoreita. Moottoreiden tehot ovat 1300 kW, jännite 500 V ja nimelliskierrosnopeus 1000 rpm. Moottoreiden N-pään laakerikilvet ovat sähköisesti eristettyjä. Moottoreita syöttää Siemens Sinamics S120 sarjan vaihtosuuntaajat. Kummallakin moottorilla on 2 kpl vaihtosuuntaajia, molemmille käämityksille omansa. Vaihtosuuntaajien tehot ovat 900 kW kukin. Moottorikaapelointi on toteutettu 3x(3x300/88) AXCMK voimakaapelilla kultakin vaihtosuuntaajalta.

Moottoreiden voimalinjoissa on kytkimien jälkeen noin 1,5 m pituiset välilaakeriputket, joista energia tuodaan kardaniakseleilla yhteen vaihdelaatikkoon. Vaihdelaatikon yhteydessä on keskitelan toisen pään laakerointi. Itse keskitela painaa noin 55 000 kg ja se pyörittää puristinta. Moottorit ottavat normaalissa ajotilanteessa 400 – 500 kW tehon. Valtavan pyöritettävän massan vuoksi niiden tulee kuitenkin olla nimellisteholtaan selvästi normaalia kuormitusta suurempia. Kiihdytystilanne kestää useita minuutteja ja moottorit ottavat yli nimellisvirtansa suuruista virtaa koko tämän ajan.

### 3.2.1 Kohteen historia

Kohteen moottorit ja vaihtosuuntaajat oli uusittu vuonna 2012 toteutetussa tuotantokapasiteetin nostoprojektissa. Samassa yhteydessä vaihdelaatikko oli huollettu nousseiden värähtelytasojen johdosta. Vaihdelaatikon hampaissa oli havaittu virran aiheuttamaa kulumaa. Tämän vuoksi Siemens oli toteuttanut käyttöjen uusinnan jälkeen laakerivirtamittaukset molempiin moottorikäyttöihin. Taulukossa 1 on esitetty akseli- ja laakerijännitemittaukset A-käytöstä.

TAULUKKO 1. Keskitela A-käytön akseli- ja laakerijännitemittaukset vuonna 2012.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Tasajännite $U_{dc}$ [ V ]	<0,5V	0,5...0,7 V	>0,7 V
			<b>2,09 V</b>
Sinimuotoinen vaihtojännite $U_{rms}$ [ V ]	<0,3V	0,3...2,0 V	>2,0 V
		<b>0,65 V</b>	
Vaihtojännitepulssien huippuarvo $U_p$ [ V ]	<3 V	3...10 V	>10 V
			<b>12,8 V</b>

Mittausten mukaan A-käytössä oli esiintynyt vaarallisen korkeita tasajännitekomponentteja, sekä vaihtojännitepiikkejä. Jännitemittausten perusteella voidaan jo päätellä, että moottorin laakerin läpi oli kulkenut virtaa. Akselijännitettä saattoi syntyä virran kulkeuttakin, joten myös laakerivirtamittaukset oli päätetty suorittaa. Virtamittausten tulokset on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Keskitela A-käytön laakerivirtamittaukset vuonna 2012.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
		<b>22mA</b>	
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
	<b>0,086 A</b>		

Taulukosta 2 havaitaan, että laakerivirta ei ole ollut hälyttävällä tasolla. Siemens ei kuitenkaan ollut mitannut akselin maadoitusvirtaa kohteesta. Akselin maadoitusvirta on tässä kohteessa todennäköisempi, koska vaihdelaatikon hampaissa oli havaittu virran aiheuttamaa kulumaa. Taulukossa 3 on esitetty keskitela B-käytön akseli- ja laakerijännitemittaukset samalta ajankohdalta.

TAULUKKO 3. Keskitela B-käytön akseli- ja laakerijännitemittaukset vuonna 2012.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Tasajännite $U_{dc}$ [ V ]	<0,5V	0,5...0,7 V	>0,7 V
			<b>0,96 V</b>
Sinimuotoinen vaihtojännite $U_{rms}$ [ V ]	<0,3V	0,3...2,0 V	>2,0 V
			<b>2,1 V</b>
Vaihtojännitepulssien huippuarvo $U_p$ [ V ]	<3 V	3...10 V	>10 V
		<b>7,4 V</b>	

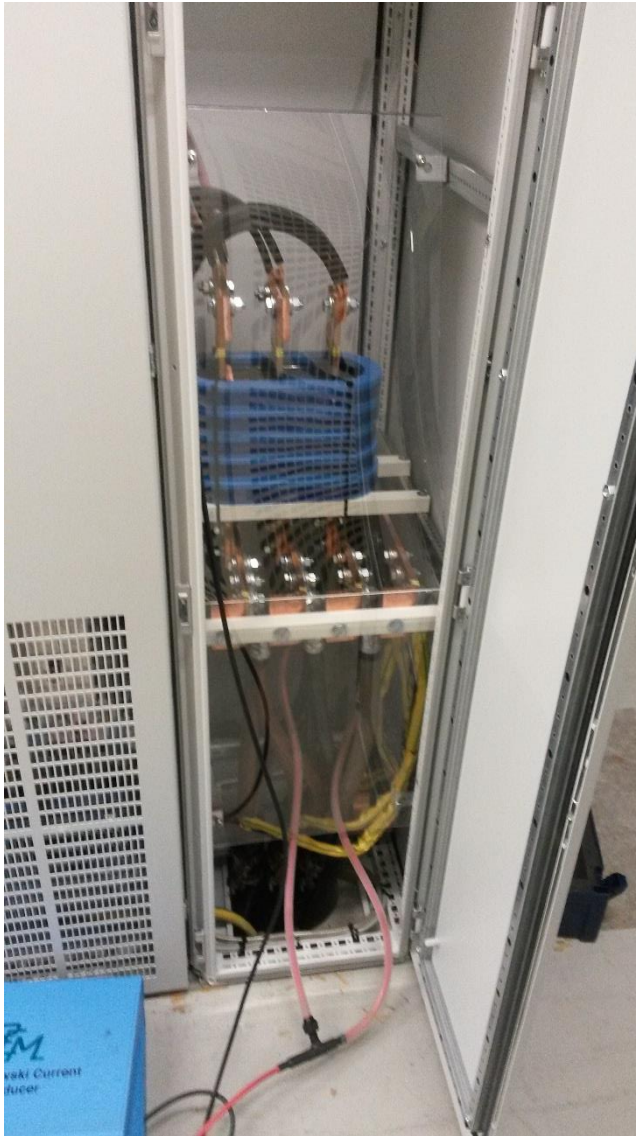
Taulukosta 3 havaitaan, että B-käytössä oli tasajännitekomponentti selkeästi A-käyttöä pienempi, samoin vaihtojännitepulssien huippuarvo. Sinimuotoisen vaihtojännitteen tehollisarvo kuitenkin oli suurempi. Moottorissa oli siis ongelma akseli- ja laakerijännitteen suhteen. Laakerivirtamittausten tulokset on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Keskitela B-käytön laakerivirtamittaukset vuonna 2012.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
	<b>10 mA</b>		
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
	<b>0,072 A</b>		

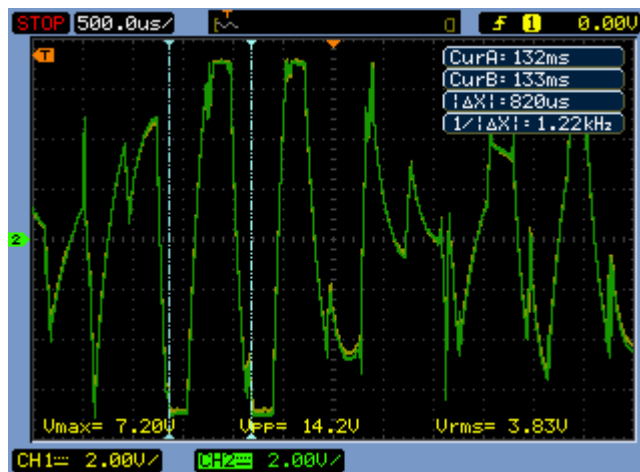
Taulukosta 4 havaitaan, että B-käytössä ei ollut varsinaista laakerivirtaongelmaa. Kuitenkin tämänkin kohteen osalta oli suuri epäily, että kyseessä oli akselin maadoitusvirta laakerivirran sijaan. Näiden mittaustulosten perusteella Siemens suositteli toteutettavaksi seuraavaksi kuvattuja toimenpiteitä, jotka suoritettiin vuonna 2012.

Jokaisen vaihtosuuntaajan lähtöön asennettiin CMF-suodattimet. Suodattimet mitoitettiin kohteen tehon ja mitattujen häiriötaajuuksien perusteella. Kuvassa 1 on esitetty CMF-suodatin, josta lähtevää vaihevirtaa mitataan Rogowskin kelalla.



KUVA 1. CMF-suodatin (sininen) Sinamics vaihtosuuntaajan lähdössä (Kuva: Joni Järvi 2013).

CMF-suodatin on ferriittirengas, jonka läpi tuodaan moottorin syöttökaapelit. Ferriittirengaaseen tehtävä on poistaa suuria vaihtosuuntaajalta lähteviä taajuuksia. Rengas voidaan ajatella lähtöön kytkettynä impedanssina, jonka arvo kasvaa taajuuden kasvaessa (Murata Manufacturing Co., 23). Rengas muuttaa tässä sovelluksessa lähtövirran korkeimmat taajuuksien lämmöksi. Korkeimpien taajuuksien poistaminen moottorilta pienentää yhteismuotoisen jännitteen muutosnopeutta ja pienentää tätä kautta laakerivirran riskiä.



KUVIO 9. Vaihtosuuntaajan lähtövirta mitattuna Rogowskin kelalla.

Kuviossa 9 on esitetty vaihtosuuntaajan lähtövirta Rogowskin kelalla mitattuna. Kuviossa ilmenee hyvin vaihtosuuntaajan kytkentätaajuus 1,25 kHz. Mittauksessa käytetyn Rogowskin kelan herkkyyden ollessa 50 mV/A voidaan virran huippuarvo  $I_{max}$  laskea kaavalla 4.

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{S_i} \quad (4)$$

,jossa

$V_{max}$  = oskilloskoopin mittaama jännitteen huippuarvo

$S_i$  = Rogowskin kelan herkkyys

Virran huippuarvoksi kuvion 1 ajanhetkellä tulee

$$I_{max} = \frac{7200 \text{ mV}}{50 \text{ mV/A}} = 144 \text{ A}$$

Lähtövirta oli todellisuudessa tätä suurempi. Käyttämämme Rogowskin kelan maksimivirta oli 120 A, joten se ei näytä todellista virran suuruutta, vaan leikkaa osan pois. Kela ei hajoa, vaikka sillä mittaisi nimellisvirtaa suurempaa virtaa. Virran nousunopeus ei kuitenkaan saa ylittää käyttämällämme kelalla 40 kA/μS. Tällainen nousunopeus on niin suuri, ettei sitä esiinny moottorikäytöissä.



Toisena toimenpiteenä kohteeseen tehtiin moottoreiden ja välilaakereiden maadoittaminen paperikoneen runkoon. Kuvassa 2 on esitetty lisämaadoitusten kytkentäpiste paperikoneen hoitotason rungossa.



KUVA 2. Keskitelan käyttöjen lisämaadoitukset hoitotason rungossa (Kuva: Joni Järvi 2013).

Lisämaadoitukset on toteutettu maadoittamalla

- Moottoreiden kytkentäkotelot moottoreiden runkoihin
- Voimalinjan välilaakerit moottoreiden runkoihin
- Voimalinjan välilaakerit kuvan 2 maadoituspisteeseen
- Moottoreiden rungot kuvan 2 maadoituspisteeseen
- Moottoreiden rungot vaihtosuuntaajien PE-pisteeseen



Maadoituksissa on käytetty 120 mm<sup>2</sup> pyöreää MKEM kytkentäjohtinta. Kaapelointimatka moottoreilta kuvan 2 pisteeseen on noin 20 m. Kuvan 2 maadoituspiste on paperikoneen käyttöpuolen hoitotason rungon osa, eikä varsinaisesti paperikoneen runkoa. Lisämaadoitukset tulisi toteuttaa maadoittamalla moottori ja kuormakone keskenään, sekä koko voimalinja käytettävän laitteen runkoon. Tässä tapauksessa voimalinja tulisi maadoittaa suoraan paperikoneen runkoon. Lisäksi maadoitukset suositellaan tehtäväksi liitteellä kaapelilla induktanssin pienentämiseksi, koska maadoitusvirrat sisältävät usein hyvin korkeataajuisia virtoja, jolloin pienikin induktanssi aiheuttaa jännitehäviötä maadoitusjohtimessa. (ABB 2000, 17). Voimalinjan maadoitus olisi hyvä toteuttaa molemmiin puolin voimalinjaa, maadoitusjohtimet vähintään 200 mm päässä toisistaan.

## **4 LAAKERIVIRTOJEN KENTTÄMITTAUKSET**

### **4.1 Mittalaitteiden hankintaprosessi**

Opinnäytetyö alkoi mittalaitteiden hankintaprosessilla sen jälkeen, kun laakerivirtaongelma yrityksessä tuli selville. Tiedossa oli myös, että yritykseen oli hankittu jo aiemmin yksi Rogowskin virtalenkki. Mittalaitteiden hintaluokan ja mittauspalveluiden veloituksen huomioiden hankittiin yritykseen omat mittalaitteet. Prosessi alkoi sillä, että selvitettiin mikä on laakerivirtailmiö ja kuinka se muodostuu. Tämän jälkeen seurattiin itse mitaustapahtumaa Tuomo Hammarin suorittamana Tampereen projektityö Ky:stä. Kertyneiden tietojen perusteella alkoi tarvesuunnittelu, jonka jälkeen tehtiin mittalaitteista tarjouspyynnöt ja tilattiin ne yritykseen.

#### **4.1.1 Tarvesuunnittelu**

Mittalaitteiden tarvesuunnittelu alkoi selvittämällä mahdolliset olemassa olevat laitteet yrityksessä. Oskilloskoopiksi vaihtoehtona oli Fluke Scopemeter 100 MHz. Tässä kuitenkin ongelmana oli datan tallennus, eli kuvien tallennusta varten olisi oltava tietokone aina kentällä mukana liitettynä Scopemeteriin. Hyvänä puolena voidaan mainita laitteessa oleva akku, jolloin verkkovirtaa ei välttämättä tarvita. Teollisuuslaitoksessa on kuitenkin lähes poikkeuksetta verkkovirtaa saatavana läheltä mitauskohdetta. Suoraan USB muistiin tallentavalle, kätevän kokoiselle oskilloskoopille oli näin ollen tarvetta. Lisäksi yrityksessä oleva 400 mm Rogowskin virtalenkki oli liian lyhyt akselin maadoitusvirran mittaukseen, koska se ei ylety moottorin kytkinsuojan ympärille. Turvallisuussyistä akselin maadoitusvirta on mitattava aina suojan ympäriltä, ei milloinkaan suoraan pyörivän akselin päältä.

#### **4.1.2 Tarjouspyynnöt**

Yrityksessä oleva 400 mm pitkä Rogowskin kela oli hankittu vuonna 2009 Kontram Oy:ltä. Samasta yrityksestä pyydettiin tarjous 1500 mm pitkistä lenkistä. Tämän pituinen

lenkki ylettyi suurimman tehtaalta löytyneen linjakäyttömootorin kytkinsuojan ympärille. Hankimme 1500 mm pitkän lenkin elokuussa 2013. Opinnäytetyöni jatkuessa hankimme vielä 1900 mm pitkän lenkin tammikuussa 2014. Rogowskin kelojen hankintahinnat olivat noin 1000 € kappale.

Oskilloskoopin hankinnassa vähimmäisvaatimukseksi asetin 100 MHz kaistanleveyden, 500 MS/s näytteenottotaajuuden ja kuvien tallennuksen digitaaliseen muotoon. Lisäksi laitteen tuli olla kooltaan pieni ja kestävä kenttämittauksia ajatellen. Yleiselektronikasta löytyi varsin kattava valikoima oskilloskooppeja. Muutaman asiantuntijamielipiteen perusteella päädyttiin Agilent -merkkiseen laitteeseen. Malli DSO1024A oli ominaisuuksiltaan täysin riittävä. Sen tärkeimmät ominaisuudet olivat

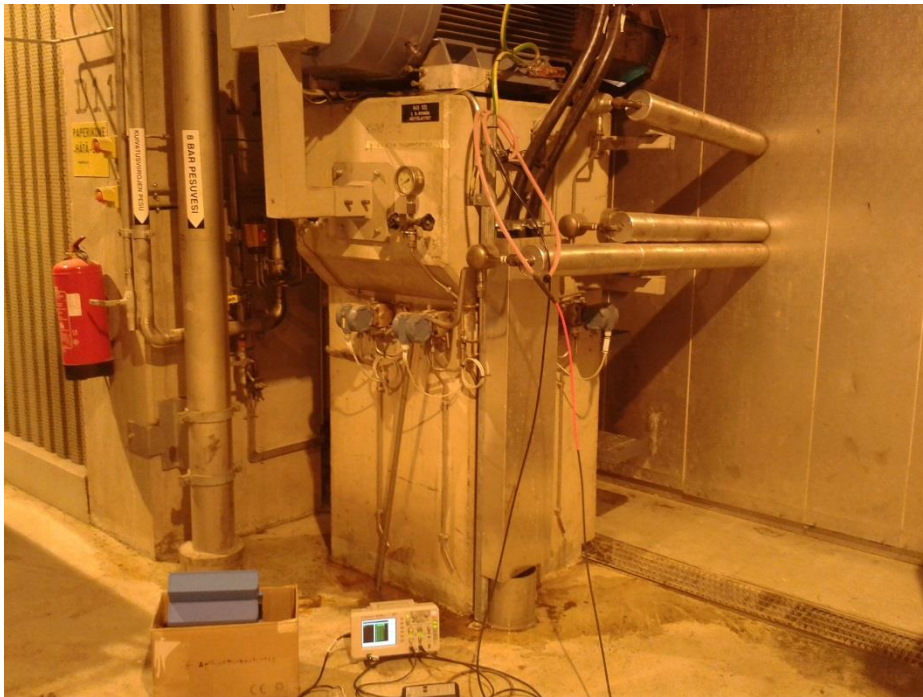
- Kaistanleveys 200 MHz
- 4 kanavaa
- 2 GS/s näytteenottotaajuus
- Muisti 10 kpts per kanava
- Mahdollisuus tallentaa data USB flash muistiin
- Hinta noin 1700 €

Ongelmaksi tämän laitteen osalta muodostui kuitenkin saatavuus. Toimitusaika olisi ollut 5-6 viikkoa, joten aikataulutussyistä täytyi alkaa harkita nopeammin saatavilla olevan laitteen hankintaa. Muutaman päivän toimitusajalla oli saatavana DSO1102B mallista laitetta. Sen suoritearvot olivat huonommat, kuin ensiksi esitetyssä laitteessa, mutta myös hinta oli varsin kohtuullinen. Lopulta hankitun oskilloskoopin ominaisuudet olivat

- Kaistanleveys 100 MHz
- 2 kanavaa
- 1 GS/s näytteenottotaajuus
- Muisti 8 kpts per kanava
- Mahdollisuus tallentaa data USB flash muistiin
- Hinta noin 850 €

## 4.2 Mittaustulokset

Suoritimme kohteista kenttämittaukset ennen mitään toimenpiteitä, jotta saadaan referenssiä ulkopuolisten toteuttamiin mittauksiin. Lisäksi 2B-ryhmän osalta oli mittaukset suoritettava joka tapauksessa, koska aiempia laakerivirtamittauksia ei ollut. Mittauksissa käytettiin PSK 7708 standardin mukaisia mittaustapoja. Yrityksen käyttöön laadittiin laakerivirtojen mittauspöytäkirjan Exceliin. Pöytäkirja voidaan tulostaa tyhjänä, kirjata tulokset kentällä ja siirtää ne sähköiseen muotoon erilliseen seurantataulukoon. Mittauspöytäkirja on esitetty liitteessä 2. Kuvassa 3 mitataan moottorilta vaihtosuuntaajalle menevän lisämaadoituksen virtaa kahdella Rogowskin keloilla.

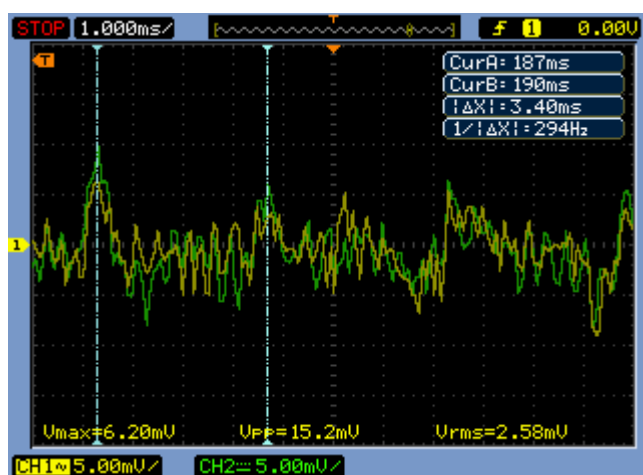


KUVA 3. Lisämaadoituksen virran mittaus Rogowskin keloilla. (Kuva: Joni Järvi 2013).

Työssä esiteltyjen kahden esimerkkikohteen lisäksi suoritettiin mittauksia UPM-Kymmene Oyj:n Kaipolan yksikössä yhteen kohteeseen. Kohteessa oli varsin suuri akselin maadoitusvirta, joka kulutti vaihdelaatikon hampaita voimakkaasti. Suoritetuista mittauksista on mittausraportti esitettyä liitteessä 3.

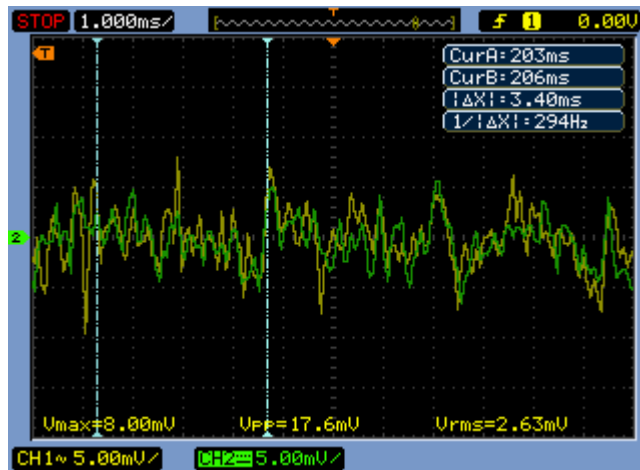
#### 4.2.1 2B ryhmän käyttö

Suoritimme ensimmäiset mittaukset kohteeseen 27.9.2013 paperikoneen ollessa normaalissa tuotannossa. Tutkimme ensin moottorin syöttökaapeloinnin summavirran ja lisämaadoituksen kautta maadoittuvan virran. Kuviossa 10 on oskilloskooppikuva toisen moottorikaapelin summavirrasta. Myös toisessa moottoria syöttävässä kaapelissa summavirta oli samaa luokkaa. Moottorikaapeleiden yhteenlaskettu summavirran RMS-arvo oli 100 mA ja huippuarvo 250 mA.



KUVIO 10. 2B-ryhmän käytön toisen moottorikaapelin summavirta.

Kuviossa 11 on oskilloskooppikuva kohteen vaihtosuuntaajalle menevän lisämaadoituksen virrasta. Virran RMS arvo on noin 50 mA ja huippuarvo 160 mA. Virran kuvaajissa on nähtävissä samoja taajuuksia, joten voidaan sanoa, että summavirrasta noin puolet maadoittuu lisämaadoituksen kautta. Kohteessa jää näin ollen mahdollisuus virran maadoittumiselle muuta reittiä.



KUVIO 11. 2B-ryhmän käytön moottorin lisämaadoituksen virta.

Moottorista oli mahdollista mitata akselijännite molemmista päistä, joten mittasimme myös N-pään jännitteet. Kuten taulukosta 5 ilmenee, D-päässä ei akselijännitettä ollut siihen asennetun maadoitushiilen vuoksi.

TAULUKKO 5. 2B-käytön moottorin akselijännite D-päästä.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Tasajännite $U_{dc}$ [ V ]	<0,5V	0,5...0,7 V	>0,7 V
	<b>1,2 mV</b>		
Sinimuotoinen vaihtojännite $U_{rms}$ [ V ]	<0,3V	0,3...2,0 V	>2,0 V
	<b>2 mV</b>		
Vaihtojännitepulssien huippuarvo $U_p$ [ V ]	<3 V	3...10 V	>10 V
	<b>8,8 mV</b>		

Moottorin N-pään akselilla oli takometri pyörintänopeuden mittausta varten. Takometrin ja puhaltimen kotelon välissä oli tilaa, josta pystyi mittaamaan akselijännitteen. Mittaus-tulokset on esitetty taulukossa 6. Havaitsimme, että akselilla oli jännitettä puhaltimen päässä. Vaikka roottorin toinen pää on maadoitettu, voi toisessa päässä silti olla jännite. Jännite N-päässä ei kuitenkaan ole haitallista, koska laakerikilpi on eristetty ja virta ei näinollen pääse kulkemaan kuin kapasitiivisesti. Kapasitiivinen laakerivirta on yleisesti niin pieni, ettei se aiheuta kipinäointia eikä ole näin ollen ongelma (Särkimäki 2009, 19).

TAULUKKO 6. 2B-käytön moottorin akselijännite N-päässä.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Tasajännite $U_{dc}$ [ V ]	<0,5V	0,5...0,7 V	>0,7 V
	<b>0,013 V</b>		
Sinimuotoinen vaihtojännite $U_{rms}$ [ V ]	<0,3V	0,3...2,0 V	>2,0 V
		<b>0,8 V</b>	
Vaihtojännitepulssien huippuarvo $U_p$ [ V ]	<3 V	3...10 V	>10 V
		<b>4,8 V</b>	

Seuraavaksi siirryimme virtamittauksiin. Mittasimme kiertovirrat roottorin molemmista päistä. Taulukossa 7 on esitetty kiertovirrat moottorin D-päästä. Roottorin maadoitushiili oli paikallaan mittausten ajan, koska sitä ei saanut ajon aikana turvallisesti irti. Todellinen kiertovirta saattaa siis olla jopa mitattua suurempi, koska osa virrasta meni maadoitushii-  
len kautta. Kiertovirta oli laakereille haitallisella tasolla. Maadoitushiili kuitenkin elimi-  
noi kiertovirran laakerivaikutuksen, koska kuten taulukosta 5 ilmenee, akselilla ei ollut  
jännitettä.

TAULUKKO 7. 2B-käytön moottorin kiertovirta D-päässä.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
			<b>150 mA</b>
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
		<b>1,2 A</b>	

Kiertovirta N-päässä oli noin kaksinkertaisella tasolla D-pään vastaavaan verrattuna, ku-  
ten taulukosta 8 ilmenee. Tämä johtuu suurimmalta osin D-pään maadoitushiilestä, joten  
todellisuudessa kiertovirrat ovat samalla tasolla molemmissa päissä. Moottorissa ei kui-  
tenkaan todennäköisesti ole kyse kiertovirran aiheuttamasta ongelmasta eristetyn N-pään  
laakerikilven ja D-pään maadoitushiilen vuoksi.

TAULUKKO 8. 2B-käytön moottorin kiertovirta N-päässä.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
			<b>300 mA</b>
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
			<b>2,2 A</b>

Kohteesta mitattiin viimeiseksi akselin maadoitusvirta. Tämän tyyppisissä kohteissa saat-  
taa ongelmana olla juuri edellä mainittu laakerivirran tyyppi, koska kuormalaite, tässä  
tapauksessa paperikoneen runko on hyvin maadoitettu ja pieni-impedanssinen reitti yh-  
teismuotoiselle virralle. Kuitenkin taulukosta 9 ilmenee, että akselin maadoitusvirta ei ole  
kohteessa ongelma.

TAULUKKO 9. 2B-käytön akselin maadoitusvirta.

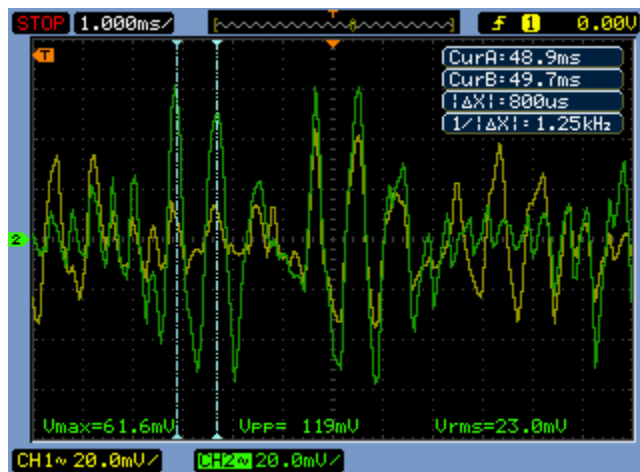
<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
		<b>22 mA</b>	
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
	<b>70 mA</b>		

#### 4.2.2 Keskitelan A käyttö

Tämän työn osalta päädyttiin keskittymään vain keskitelan A-käyttöön, jotta työn laajuus  
pysyisi sille asetetuissa raameissa. Valitsimme A-käytön tässä vaiheessa lähinnä sen suu-  
remman akselijännitteen vuoksi. Suoritimme ensimmäiset mittaukset 20.9.2013. Koh-  
teessa ei päässyt mittaamaan virtoja ja jännitteitä N-päästä, joten suoritimme mittaukset  
vain D-päästä. Mittaushetkellä moottorin kuormitus oli 400 kW, taajuus 55,1 Hz ja no-  
peus 1100 rpm.

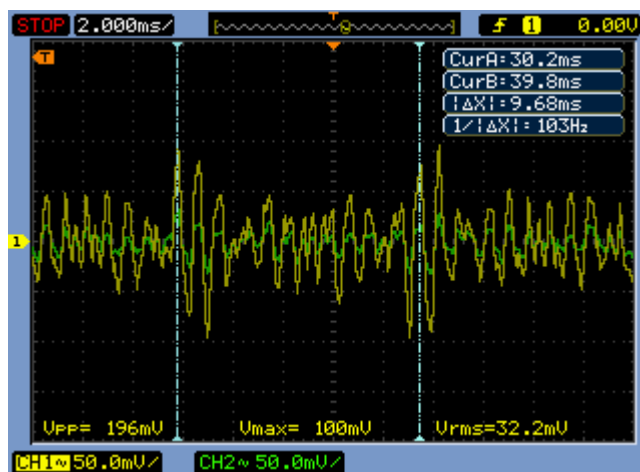


Ensimmäisenä mittasimme moottorin syöttökaapeleiden summavirrat. Moottoriin tulee yhteensä kuusi syöttökaapelia, kolme kumpaakin käämitystä kohti. Kuviossa 12 on esitetty oikean puoleisen 1. syöttökaapelin summavirta. Summavirroissa oli melko suuria eroja eri kaapeleiden välillä. Kuvion 5 summavirta oli suurin kaikista moottorin syöttökaapeleista RMS-virran ollessa 460 mA ja huippuarvon 1,2 A. Moottorin vasemman puoleisen 3. syöttökaapelin summavirta oli pienin RMS-arvon ollessa vain 70 mA ja huippuarvon 100 mA. Kaikista summavirroista oli havaittavissa 1,25 kHz:n, eli kytkentätaajuuden suuruinen taajuuskomponentti.



KUVIO 12. Moottorin oikean puolen 1. syöttökaapelin summavirta.

Moottorilta vaihtosuuntaajan maadoituspisteeseen lähtevän virran RMS-arvo oli 650 mA ja huippuarvo 2 A. Virran perustaajuus oli sama kuin summavirran, eli 1,25 kHz. Virrassa esiintyi lisäksi 100 Hz taajuudella kuviossa 13 näkyviä purskeita. Maadoituksen virta ei sisältänyt korkeita taajuuksia, eli korkeimmat taajuudet eivät maadoitu tätä kautta.



KUVIO 13. Moottorin lisämaadoituksesta taajuusmuuttajalle lähtevä virta.

Mittauksiemme tulokset akselijännitteen osalta on esitetty taulukossa 10. Tulokset eivät ole täysin samat, kuin Siemensin mittaamat. Ero voi johtua monesta seikasta, kuten moottorin mittaushetken kuormituksesta, oskilloskoopin tallennushetkestä tai käytetyistä mitauslaitteista. Eri oskilloskoopit saattavat esimerkiksi laskea vaihtojännitteen RMS-arvon eri tavalla. Mittauspalveluja tarjoavat yritykset saattavat käyttää RMS-arvon mittaukseen myös erillistä tehollisarvomuunninta, mutta Siemensillä ei ollut sellaista käytössään. Taulukosta 10 nähdään, että kohteen akselijännite on PSK 7708 standardin määrittämän epävarman alueen yläpäässä.

TAULUKKO 10. Keskitela A-käytön akselijännite.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Tasajännite $U_{dc}$ [ V ]	<0,5V	0,5...0,7 V	>0,7 V
		<b>0,6 V</b>	
Sinimuotoinen vaihtojännite $U_{rms}$ [ V ]	<0,3V	0,3...2,0 V	>2,0 V
		<b>1,82 V</b>	
Vaihtojännitepulssien huippuarvo $U_p$ [ V ]	<3 V	3...10 V	>10 V
		<b>10 V</b>	

Kohteen kiertovirran mittauksesta saatiin taulukon 11 mukaiset arvot. Virran tehollisarvo oli laakereille vaarallisen korkea. Virran huippuarvo jäi kuitenkin alle haitallisen tason. Moottorissa on eristetty N-pään laakerikilpi, joten todellisuudessa tätä kiertovirtaa ei moottorin sisällä kulje.

TAULUKKO 11. Keskitela A-käytön kiertovirta.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
			<b>72 mA</b>
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
	<b>0,24 A</b>		

Kohteen akselin maadoitusvirta mitattiin pitkällä Rogowski-lenkillä moottorin kytkinsuojan ympäriltä. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 12. Akselin maadoitusvirta oli samaa luokkaa, kuin kiertovirtakin. Siemensin suorittamissa mittauksissa on esitetty vain laakerivirta, joka jätti hieman epäselväksi oliko kyseessä kiertovirta vai akselin maadoitusvirta. Mittaamamme tulokset olivat molempien osalta selkeästi suuremmat. Näiden tulosten johdosta päätettiin ryhtyä toimenpiteisiin akselin maadoitusvirran pienentämiseksi.

TAULUKKO 12. Keskitela A-käytön akselin maadoitusvirta.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
			<b>79 mA</b>
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
	<b>0,136 A</b>		

## 5 KORJAAVAT TOIMENPITEET

### 5.1 Korjaustavat

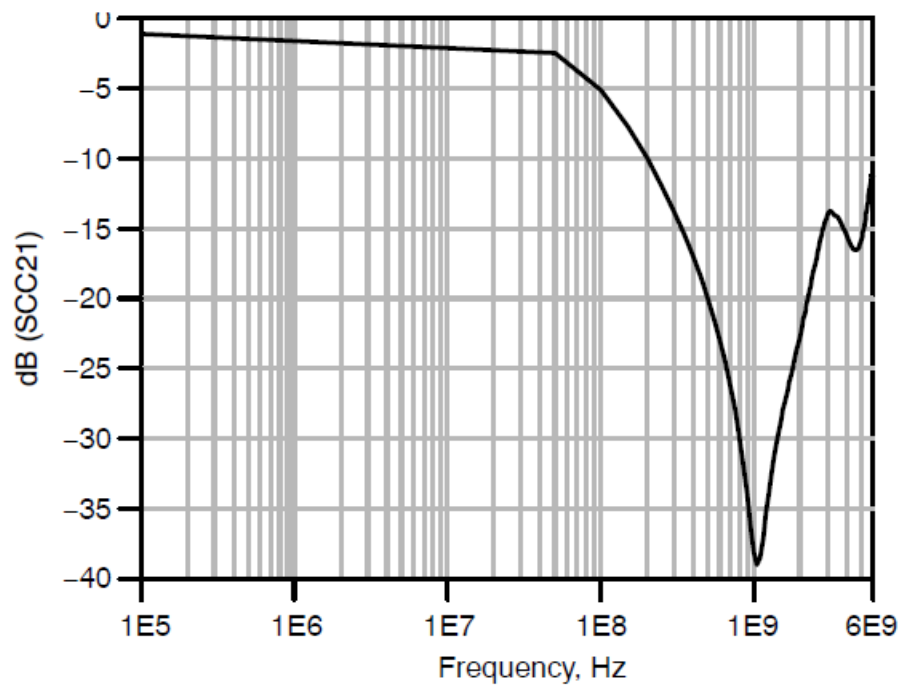
Laakerivirtojen eliminoimiseen on olemassa useita eri keinoja. Keinojen käyttö riippuu kohteen laakerivirtatyypistä. Oikea keino pienentää tai poistaa ongelman, mutta väärä toimenpide puolestaan voi pahentaa ongelmaa. Tästä syystä on tärkeää selvittää laakerivirran tyyppi ennen toimenpiteitä. Taulukosta 13 ilmenee käytännössä kaikki mahdolliset toimenpiteet laakerivirtaongelmien pienentämiseen. Yleisimmin käytetyt toimenpiteet ovat moottorin lisämaadoitus ja akselin maadoitus. Nämä toimenpiteet ovat juuri sellaisia, jotka voivat pahentaa ongelmaa, jos niitä käytetään väärässä laakerivirtatyypissä.

Eristettyjä laakereita tai eristettyjä laakerikilpiä käytetään yleisesti suuremmissa moottoreissa. Siemens suosittelee 1LG standardimoottoreihin 225 runkokoosta ylöspäin eristettyjä laakereita N-päähän. Taajuusmuuttajakäyttöön suunnitellut Siemens moottorit on varustettu eristetyillä N-pään laakereilla vakiona. Eristetyillä laakereilla varustetuissa moottoreissa tulee takometrin asennuksessa huomioida, että se on galvaanisesti eristetty moottorin rungosta. (Siemens 2013, 133).

Taajuusmuuttajan lähtösuodattimista yleisimmin käytössä on  $du/dt$ -suodin. Sen tarkoituksena on rajoittaa jännitteen nousunopeutta kytkentähetkellä. Pääasiallinen tarkoitus nousunopeuden pienentämisessä on vähentää moottorin eristysten jänniterasituksia (ABB 2013, 64). Koska kiertovirta aiheutuu jännitteen suuresta nousunopeudesta, suodattimen toinen tehtävä on pienentää kierovirran riskiä moottorissa. Toinen käytetty lähtösuodatin on CMF-suodatin, jonka pääasiallinen tehtävä on pienentää laakerivirran riskiä. Suodatin koostuu ferriittirenkaasta, jonka läpi moottorin syöttökaapelit kulkevat joko suoraan tai muutaman kerran renkaan ympäri kierrettyinä. Suodatin on viritetty tietylle taajuudelle, jolla sen vaimennus on suurimmillaan. Suodattimen vaimennus muuttuu jyrkästi taajuuden funktiona esimerkiksi kuvion 14 (s. 38) mukaisesti.

TAULUKKO 13. (Särkimäki V., Radio Frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors, doctoral dissertation, LUT, 2009.)

Toimenpide	Laakerivirran tyyppi		
	EDM-virrat	Kiertävät virrat	Akselin maadoitusvirrat
Akselin maadoitus (hiili, Aegis rengas)	Vaaditaan pieni impedanssi	Vaaditaan pieni impedanssi	Voi jopa pahentaa ongelmaa
Eristetyt tai keraamiset laakerit	Vaatii, että molemmat laakerit ja kuorma eristetään	Toinen pää pitää eristää	Molemmat päät on eristettävä
Moottorin lisämaadoitus ja/tai suojatut moottorikaapelit	Ei toimi	Voi jopa pahentaa ongelmaa	Toimii
Taajuusmuuttajan lähtösuotimet	Toimii, jos suodin poistaa yhteismuotoista jännitettä	Toimii	Toimii
Eristetty kytkin moottorin ja kuormalaitteen välille	Toimii kuormakoneelle	Ei toimi, virta kiertää moottorin sisällä	Toimii
Faradayn häkki staattorin ja roottorin välille	Toimii	Ei toimi	Toimii
Taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden laskeminen	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa
CM-jännitettä optimoiva taajuusmuuttajan modulointi	Toimii, jos poistaa yhteismuotoista jännitettä	Toimii, jos poistaa yhteismuotoista jännitettä	Toimii, jos poistaa yhteismuotoista jännitettä
Staattorin urien vuoraaminen johtavilla liuskoilla	Ei toimi	Toimii	Vaatii kunnollisen maadoituksen
Taajuusmuuttajan välipiirin jännitetasojen lisääminen	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa



Kuvio 14. Ferriittirenkaan vaimennus taajuuden funktiona (Semiconductor Components Industries, 2011).

Eristetty kytkin moottorin ja kuormakoneen välille on myös jonkin verran käytössä oleva toimenpide akselin maadoitusvirran poistamiseen. Sähköisesti eristäviä kytkimiä on esimerkiksi kumielementein varustetut sakara- ja tappikytkimet. Näissä kytkimissä voi kuitenkin muodostua kapasitiivinen kytkentä kumielementin yli suurilla koneilla ja suuritaajuisilla virroilla. Keraamisilla eristeillä varustetussa kytkimessä ei muodostu kapasitiivista kytkentää, joten se on käyttökelpoinen ratkaisu akselin maadoitusvirran reitin katkaisemiseen. (Lumia 2013, 17).

## 5.2 Toimenpiteet 2B ryhmään

Toteutettujen mittausten perusteella päädyimme kokeilemaan voimalinjan maadoitusta kohteessa. Voimalinjan maadoituksella pyritään pienentämään akselin maadoitusvirtaa, joka ei ollut kohteen ongelma. Toimenpide oli kuitenkin helppo ja nopea tehdä ja sen vaikutukset voitiin mitata. Lisäksi kohteeseen tilattiin Aegis-maadoitusrengas hankittaessa sellaista keskitelan käyttöön.

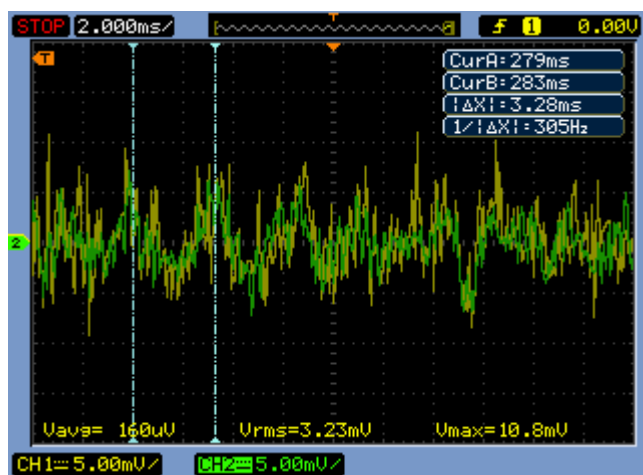
Voimalinjan maadoitus toteutettiin kuvan 4 mukaisesti. Moottorin molemmilta sivuilta vietiin 120 mm<sup>2</sup> pyöreät kuparikaapelit kardaanisuoja pitkin paperikoneen runkoon lähelle höyräsynterinin vaihdelaatikkoa. Maadoitus olisi hyvä toteuttaa lattakaapelilla, mutta sitä ei ollut saatavissa nopealla aikataululla. Lisäksi voimalinjan maadoitus oli koikeluontoinen. Maadoittamisella saattaa olla tällaisessa tapauksessa jopa negatiivisia vaikutuksia.



KUVA 4. 2B-ryhmän voimalinjan maadoitus (Kuva: Joni Järvi 2013).

### 5.2.1 Toimenpiteiden vaikutus

Voimalinjan maadoituksen vaikutukset todettiin mittauksilla 14.10.2013. Paperikoneella oli normaali tuotantoajo mittauksien aikana. Mittasimme ensimmäiseksi asennettuja voimalinjan lisämaadoituksia pitkin maadoittuvan virran. Mitatun virran oskilloskooppikuva on esitetty kuviossa 15. Maadoituksen RMS-virta oli 65 mA ja huippuarvo 220 mA. Lisäksi toisesta lisämaadoitusjohtimesta kulki lähes samansuuruinen virta. Näin ollen asennettujen lisämaadoitusten virta oli suurempi, kuin olemassa olevan vaihtosuuntaajalle menevän maadoituksen virta. Tämä kertoo paperikoneen rungossa olevan hyvä maadoitusimpedanssi. Virrassa näkyi selvästi summavirrassa esiintyvä 300 Hz taajuuskomponentti. Tämä kertoo kyseessä olevan summavirran maadoittumisen, eikä jonkin muun häiriövirran.



KUVIO 15. Oikean puoleisen voimalinjan maadoitusjohtimen virta.

Seuraavaksi kohteesta mitattiin moottorin N-pään akselijännite. Mitatut arvot on esitetty taulukossa 14. Tuloksista ei ole havaittavissa merkittävää muutosta ennen maadoitusten asennusta mitattuihin arvoihin.



TAULUKKO 14. 2B-käytön moottorin akselijännite N-päässä.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Tasajännite $U_{dc}$ [ V ]	<0,5V	0,5...0,7 V	>0,7 V
	<b>0,09 V</b>		
Sinimuotoinen vaihtojännite $U_{rms}$ [ V ]	<0,3V	0,3...2,0 V	>2,0 V
		<b>0,7 V</b>	
Vaihtojännitepulssien huippuarvo $U_p$ [ V ]	<3 V	3...10 V	>10 V
		<b>5,1 V</b>	

Kohteen kiertovirtamittauksen tulokset moottorin D-pään osalta on esitetty taulukossa 15. Kiertovirran havaittiin pienentyneen hieman. Ero oli tosin melko pieni ja on vaikea sanoa johtuiko se maadoituksien asennuksesta, normaalista mittausepäätarkkuudesta vai moottorin hieman erisuuruudesta kuormasta ensimmäisiin mittauksiin verrattuna.

TAULUKKO 15. 2B-käytön moottorin kiertovirta D-päässä.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
			<b>140 mA</b>
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
	<b>0,8 A</b>		

Moottorin kiertovirta N-päässä pieneni hieman selvemmin D-päähän verrattuna. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 16. Virran RMS-arvossa havaittiin 60 mA pienentyminen ja huippuarvossa 500 mA pienentyminen. Näin suurien virran muutosten voidaan katsoa johtuneen tekemistämme muutoksista.

TAULUKKO 16. 2B-käytön moottorin kiertovirta N-päässä.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
			<b>240 mA</b>
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
		<b>1,7 A</b>	

Kohteen akselin maadoitusvirrassa ei havaittu muutosta. Tulokset on esitetty taulukossa 17. Akselin maadoitusvirta oli ensimmäisissäkin mittauksissa lähes olematon. Virran RMS-arvon ollessa vain 25 mA, ollaan jo Rogowskin virtakelan pienimmän herkkyyden rajoilla.

TAULUKKO 17. 2B-käytön moottorin akselin maadoitusvirta.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
		<b>25 mA</b>	
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
	<b>80 mA</b>		

### 5.2.2 Yhteenveto 2B-ryhmästä

Kohteen laakerivirtaongelma oli alun perin jo hieman kyseenalainen, koska moottorissa oli maadoitushiili ja eristetty laakerikilpi N-päässä. Tämä jätti vaihtoehtoiksi joko akselin maadoitusvirran tai maadoitushiilen huonon ylimenoimpedanssin. Mittauksiemme perusteella kohteessa ei ollut akselin maadoitusvirtaongelmaa ja akselijännite pysyi suhteellisen pienenä. Tekemämme lisämaadoitukset pienensivät hieman moottorin mahdollisia kiertovirtoja. Kiertovirta pääsee kulkemaan moottorissa vain kapasitiivisesti eristetyn laakerikilven ansiosta. Teoria- ja tutkimusaineiston perusteella kapasitiivinen virta ei aiheuta kipinäintiä laakereissa (Lumia 2013, 13). Mahdolliseksi laakerivirran syiksi kohteessa jää laakerikilven eristeen vuotaminen tai maadoitushiilen liian huono ylimenoimpedanssi.

Kohteeseen asennetaan seuraavassa moottorinvaihdossa Aegis-maadoitusrengas. Lisäksi uudesta moottorista tulisi koestaa laakerikilven eristeen toimivuus.

### 5.3 Toimenpiteet keskitela A-käyttöön

Mittausten, suoritettujen analyysien ja Kaipolan yksikön mittauksen ja kokemusten mukaan päädyimme toteuttamaan keskitelan A-käyttöön voimalinjan maadoituksen litteällä pu-notulla kuparikaapelilla. Kaipolan yksikössä tehdyistä mittauksista on esitetty mittausraportti liitteessä 3. Maadoitukset toteutettiin asentamalla lattakaapelit kulkemaan molemmin puolin moottoria voimalinjan suuntaisesti kohti paperikoneen runkoa. Kaapeli kiinnitettiin sähköisillä liitoksilla moottorin runkoon, välilaakeripukkiin, vaihdelaatikkoon ja paperikoneen runkoon. Kuvassa 5 näkyy oikean puoleinen lattakaapeli kiinnitettynä välilaakeripukkiin.



KUVA 5. Keskitela A-käytön voimalinjan maadoitus välilaakeripukin kohdalla (Kuva: Joni Järvi 2013).

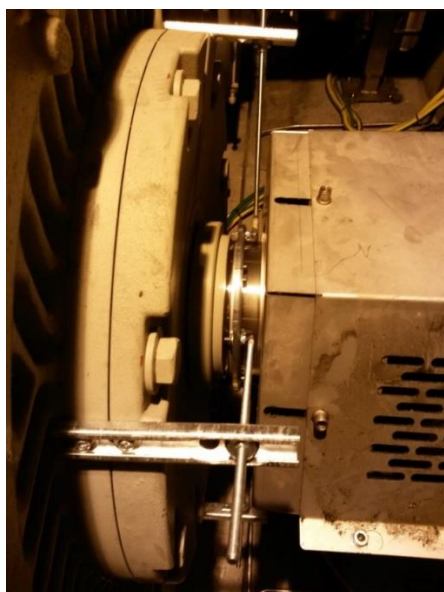
Kohteeseen hankittiin lisäksi Aegis-maadoitusrengas. Aegis maadoitusrengas koostuu alumiinisesta kehyksestä, johon on kiinnitetty tasaisesti koko kehän ympäri johtavia mikroituja. Näin saadaan suuri kosketuspinta-ala moottorin akseliin ja pieni ylimenoimpedanssi. Keskitelan käytön moottoriin soveltuva 160 mm läpimittainen Aegis-rengas on

esitetty kuvassa 6. Aegis-tuotteille ei ole Suomessa maahantuoja, mutta Hollannista löytyi Morgan Advanced Materials plc:n sivukonttori, jonka kautta saimme hankittua renkaat.



KUVA 6. Halkaistavan mallin 160 mm Aegis-rengas (Kuva: Joni Järvi 2013).

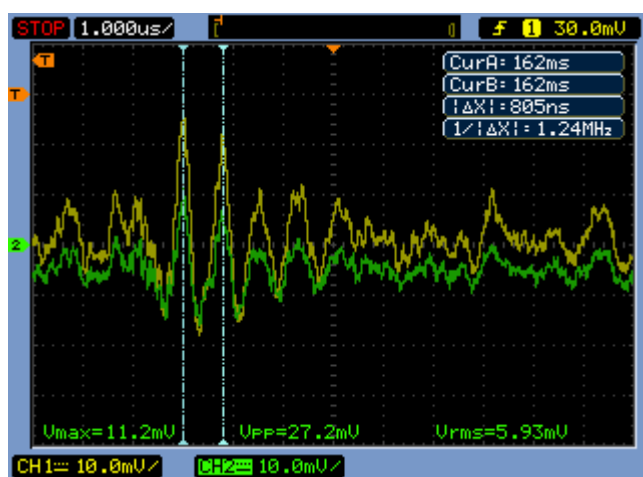
Rengas asennettiin moottorin akselille itse tehdyllä telineellä ja maadoitettiin oikean puoleiseen lattakaapeliin siten, että kaapeli lähti renkaalta ja kulki koko voimalinjan matkan vaihdelaatikolle ja paperikoneen runkoon. Kuvassa 7 on rengas paikallaan moottorin akselilla. Lattakaapeli kiinnitettiin renkaaseen kahdella M4 pultilla, jotka menevät poikki siinä tapauksessa, että renkaan teline hajoaa esimerkiksi tärinästä ja rengas lähtee pyörimään akselilla.



KUVA 7. Aegis-maadoitusrengas paikallaan (Kuva: Joni Järvi 2013).

### 5.3.1 Toimenpiteiden vaikutus

Toteutettujen toimenpiteiden vaikutus todettiin mittauksilla 23.1.2014. Paperikone oli normaalissa, melko nopeassa tuotantoajossa. Moottorin teho oli 440 kW, taajuus 57,9 Hz ja nopeus 1155 rpm. Ensimmäisenä mittasimme maadoitusrenkaan kaapelia pitkin maadoittuvan virran. Virran oskilloskooppikuva on esitetty kuviossa 16. Virran RMS arvo oli 120 mA ja huippuarvo 220 mA. Virrassa oli erittäin suuria taajuuksia, kuten kuviossa 16 esiintyvä 1,25 MHz. Tämä kertoo maadoitusreitit erittäin pienestä induktanssista.



KUVIO 16. Maadoitusrenkaan lattakaapelin virta.

Moottorin akselijännitteen mittaustulokset on esitetty taulukossa 18. Akselilta löytyi pieni jännite, koska Aegis-rengas ei ole maadoitettu suoraan moottorin runkoon. Akselijännite on kuitenkin mitätön moottorin laakereiden kannalta.

TAULUKKO 18. Keskitela A-käytön akselijännite.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Tasajännite $U_{dc}$ [ V ]	<0,5V	0,5...0,7 V	>0,7 V
	<b>0,05 V</b>		
Sinimuotoinen vaihtojännite $U_{rms}$ [ V ]	<0,3V	0,3...2,0 V	>2,0 V
	<b>0,06 V</b>		
Vaihtojännitepulslien huippuarvo $U_p$ [ V ]	<3 V	3...10 V	>10 V
	<b>0,3 V</b>		

Akselin maadoitusvirran mittaustulokset on esitetty taulukossa 19. Virta ei näyttänyt muuttuvan juuri lainkaan tilanteeseen ennen muutoksia nähden. Tämä aiheutti suuren epäilyksen, että samassa vaihdelaatikossa oleva B-käyttö aiheuttaa akselin maadoitusvirtaa, joka kiertää A-käytön maadoitusrenkaalle asti.

TAULUKKO 19. Keskitela A-käytön akselin maadoitusvirta.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
			<b>80 mA</b>
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
	<b>0,1 A</b>		

Selvitimme B-käytön akselin maadoitusvirran vaikutusta mittaamalla virran A-käytön laakeripukin ympäriltä. Tulokset on esitetty taulukossa 20. Laakeripukin läpi kulki huomattavasti suurempi virta, kuin moottorin kytkimen läpi. Tämä tukee epäilyksiä B-käytön vaikutuksesta. Osa B-käytöltä tulevasta virrasta maadoittuu siis A-käytön välilaakeripukin kautta.

TAULUKKO 20. Keskitela A-käytön akselin maadoitusvirta välilaakerilta.

<b>Haittaluokitus (PSK 7708 5.1)</b>	Hyvä, ei haitallinen	Epävarma, voi olla haitallinen	Vaarallisen korkea arvo laakerille
Laakerivirran tehollisarvo $I_{rms}$ [ mA ]	<20mA	20...50mA	>50mA
			<b>270 mA</b>
Laakerivirran huippuarvo $I_p$ [ A ]	<1A	1...2A	>2A
	<b>0,8 A</b>		

### 5.3.2 Yhteenveto keskitela A-käytöstä

Kohteeseen toteutettujen toimenpiteiden voidaan katsoa olevan toimivia ja niillä on positiivinen vaikutus kohteen mekaanisten osien kestävyys. Kohteeseen on tehtävä myös

B-käytölle lisämaadoitukset lattakaapelilla, jotta kaikki maadoitusvirta saadaan pois voimansiirtojärjestelmästä. Tätä toimenpidettä ei sisällytetty opinnäytetyöhön rajallisen käytettävissä olevan ajan vuoksi, joten se jäi yrityksen automaatiokunnossapidon vastuulle. Akselin maadoitusrengas ei ole B-käyttöön välttämätön sen pienemmän akselijännitteen vuoksi.

#### 5.4 Kustannussäästölaskelma

Seuraavaksi on esitetty esimerkki keskitelan käyttöön tehtyjen toimenpiteiden kustannussäästövaikutuksista. Esimerkissä ei ole otettu huomioon mahdollista suunnittelematonta seisakkaa jonkin komponentin äkillisen hajoamisen seurauksena. Käytännössä tällainen tilanne on hyvin harvinainen, koska moottorien ja voimansiirtokomponenttien kuntoa valvotaan jatkuvasti sekä online värähdysmittauksilla, että ennakkohuollon suorittamalla määräaikaismittauksilla. Lisäksi oletetaan, että toimenpiteillä vältetään yhdeltä turhalta vaihdelaatikkohuollolta. Vältettyjä huoltoja saattaa todellisuudessa tulla useampia. Pitkällä aikajänteellä akselin maadoitusvirta saattaa aiheuttaa ennen aikaista kulumista myös moottorin laakereihin tai välilaakeripukkiin. Esimerkissä oleva vaihdelaatikon irrotus ja asennustyö sekä hammaspyörähuolto ovat vuonna 2012 toteutetun huollon todelliset kustannukset. Myös mittaustyöt sekä lattakaapelien ja maadoitusrenkaan asennustyöt ovat todellisia kustannuksia. Laskelma on esitetty taulukossa 21.

TAULUKKO 21. Kustannussäästölaskelma.

Toimenpide	Hinta/€
Keskitelan vaihteen irrotus ja asennus	5700
Vaihdelaatikon hammaspyörähuolto	9000
Laakerivirtamittausten suoritustyö	320
Lattakaapelit ja asennus	1400
Maadoitusrengas ja asennus	1800
<b>Erotus</b>	<b>11 180</b>

Yritykseen hankittujen mittalaitteiden kustannukset olivat noin 4500 €, joten hankinnan voidaan todeta olleen kannattava jo yhden esimerkkikohteen perusteella. Mittauksia tul- laan suorittamaan säännöllisesti automaatiokunnossapidon henkilöstön toimesta jatkossa,

jolloin laitteiden hankinnan kannattavuus kasvaa jatkuvasti. Lisäksi tämä opinnäytetyön aikana luotujen ohjeiden ja annetun koulutuksen jälkeen yrityksen henkilöstö kykenee itsenäisesti suorittamaan laakerivirtojen mittauksen, tulosten tulkinnan ja korjaavien toimenpiteiden toteutuksen.



## 6 POHDINTA

Laakerivirrat oikosulkumoottoreissa on todella laaja aihe ja sen tarkempi käsittely vaatii huomattavan paljon ajankäyttöä. Kuitenkin opinnäytetyön tehtävänantoon sisällytetyt tavoitteet saatiin täytettyä melko hyvin. Tavoitteena oli kartoittaa Tervasaaren yksikössä laakerivirtojen kannalta ongelmallisia kohteita ja ottaa muutama esimerkkikohde tarkasteluun. Ongelmakohteiden laakerivirtoja tuli saada pienennettyä. Tarkastelussa oli kaksi kohdetta, joista keskitelan A-käyttöön tutustuttiin tarkemmin. Varsinkin edellä mainittuun kohteeseen löydettiin selkeästi toimivia ratkaisuja. Lattapunottu kuparikaapeli osoitautui selkeästi paremmaksi maadoituskaapeliksi, kuin pyöreä kaapeli. Mielenkiintoista olisi ollut vielä mitata pyöreän- ja lattapunotun kaapeleiden induktanssien ero.

Toisena tavoitteena oli yrityksen automaatiokunnossapidon henkilöstön koulutus aiheeseen, jotta mittaustoimintaa voidaan jatkaa oman henkilökunnan voimin jatkossa. Aiheesta järjestettiin teoriakoulutus, johon osallistui suuri osa henkilöstöstä. Lisäksi pidettiin useita käytännön koulutuksia muutamalle henkilölle. Liitteessä 1 on esitetty yrityksen käyttöön laadittu laakerivirtojen mittaushje. Yrityksen henkilöstö oli hyvin kiinnostunut aiheesta, joten toiminta jatkuu varmasti halutulla tavalla tulevaisuudessa. Toiminnan jatkon luonteesta käytiin keskustelua opinnäytetyön loppuvaiheessa. Toimintamallin vaihtoehtoina oli kohteiden ottaminen tarkasteluun ennakkohuollon suorittamien kuntoanalyysien perusteella tai seurata kriittisimpiä kohteita määräaikaistyönä. Jälkimmäistä mallia varten luotiin seurantataulukko yhden paperikoneen linjakäyttöille, johon voidaan kerätä mittaustulokset jokaisesta käytöstä. Henkilöstön päätöksestä päädyttiin toteuttamaan jälkimmäistä mallia.

Opinnäytetyöstä aiheutuu säästöjä sekä Tervasaaren yksikölle, että myös konsernitasolla, mikäli mittauksia aletaan suorittamaan myös muissa yksiköissä. Työn aikana suoritettu Kaipolan yksikön mittaustyö osoitti, että tämän kaltainen yksiköiden välinen toiminta laakerivirtamittauksissa onnistuu varsin helposti. Tieto Tervasaassa suoritettavasta laakerivirtamittaus toiminnasta on saatava yhtiön kaikkien Suomen tehtaiden sähkökunnossapidosta vastaavien henkilöiden tietoon. Hyvä kanava tähän olisi esimerkiksi sähkökäyttöryhmän kokous.

## LÄHTEET

ABB. 2000. Tekninen opas nro 5 Laakerivirrät uusissa vaihtovirtakäytöissä. PDF dokumentti. Tulostettu 29.10.2013.

[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/\\$file/Tekninenopasnro5.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/$file/Tekninenopasnro5.pdf)

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt.

ABB. 2013. ACS800-37 Hardware Manual. PDF dokumentti. Tulostettu 10.1.2014.

[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/3d5d587a24620771c1257b13003a6164/\\$file/EN\\_ACS800\\_37\\_HWMan\\_F\\_scrres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/3d5d587a24620771c1257b13003a6164/$file/EN_ACS800_37_HWMan_F_scrres.pdf)

Ahola, J. 2011. Taajuusmuuttajaohjattujen sähkömoottorikäyttöjen laakerivirrät ja niiden mittaaminen. PDF dokumentti. Tulostettu 10.1.2014.

[https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl50a0600/materiaali/tamu\\_ohjattujen\\_sahkokayttojen\\_laakerivirrät.pdf](https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl50a0600/materiaali/tamu_ohjattujen_sahkokayttojen_laakerivirrät.pdf)

Laughton, M., Warne, D. 2003. Electrical Engineer's Reference Book. 16. painos. Oxford: Newnes.

Lumia, J. 2013. Vuotovirran diagnosointi hammasvaihteessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Michigan Air. 2002. Inverter Driven Induction Motor Bearing Current Solutions. PDF dokumentti. Tulostettu 10.1.2014. <http://www.michiganair.com/newsletters/2005-4/Bearing%20currents%20white%20paper%20IEEE.pdf>

MIKES-Aalto mittaustekniikka. n.d. Mittaustekniikan perusteet. PDF dokumentti. Tulostettu 29.10.2013. [http://metrology.tkk.fi/courses/S-108.1010/Luento3\\_2006.pdf](http://metrology.tkk.fi/courses/S-108.1010/Luento3_2006.pdf)

Murata Manufacturing Co. n.d. Understanding ferrite bead inductors. PDF dokumentti. Tulostettu 10.3.2014. <http://www.murata.com/products/emc/knowhow/pdf/23to25e.pdf>

PSK Standardisointiyhdistys ry. 2004. PSK 7708 Kunnanvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Akselijännitteen- ja virran mittaust. 2. painos.

Semiconductor Components Industries. 2011. EMI4182 Common Mode Filter with ESD Protection. PDF dokumentti. Tulostettu 10.3.2014. [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/EMI4182-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/EMI4182-D.PDF)

Siemens. Sinamics engineering manual. PDF dokumentti. Tulostettu 9.1.2014.

<https://support.automation.siemens.com/WW/llis-api.dll?func=cslib.csinfo&lang=en&objID=18578405&subtype=133300>

Siemens. 2008. IEC Squirrel-Cage Motors. PDF dokumentti. Tulostettu 29.10.2013.

<http://www.industry.siemens.com.br/drives/br/pt/motores-eletricos/motores-trifasicos-mt/H-Compact/Documents/Cat%C3%83%C2%A1logo%20de%20Motores%20IEC%20D81.1%20-%202008.pdf>

Särkimäki, V. 2009. Radio frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Tohtorin väitöskirja.

University of Zagreb. n. d. Shaft voltage. PDF dokumentti. Tulostettu 10.1.2014.  
[https://www.fer.hr/download/repository/340\\_Napon\\_osovine\\_Shaft\\_voltage.pdf](https://www.fer.hr/download/repository/340_Napon_osovine_Shaft_voltage.pdf)

**LIITTEET**

Liite 1. Laakerivirtojen mittausohje

1 (11)

***LAAKERIVIRTAMITTAUSOHJE***

Tervasaari  
Automaatiokunnossapito

## Sisällysluettelo

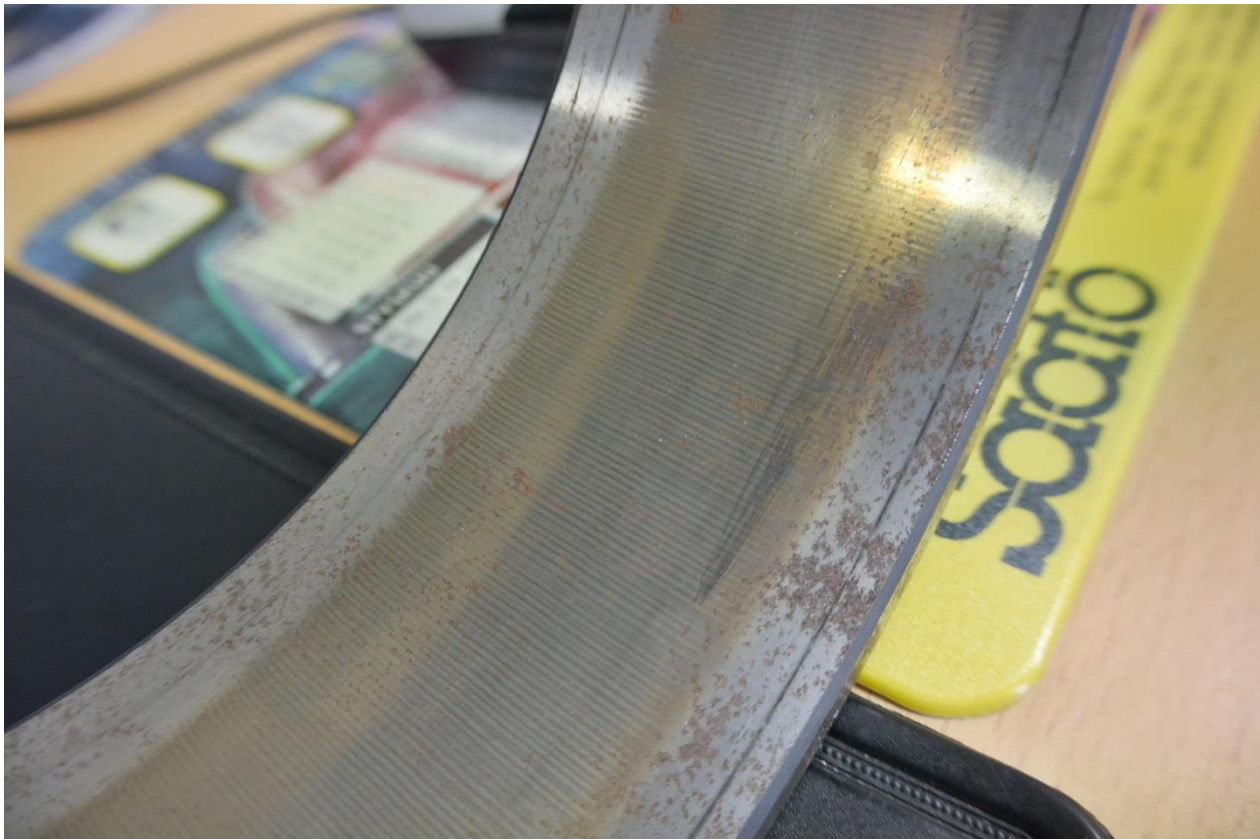
<b>1. Laakerivirran ja akselijännitteen mittaus .....</b>	<b>54</b>
<b>1.1 Tarkoitus ja perustiedot.....</b>	<b>54</b>
<b>1.2 Mittalaitteet .....</b>	<b>55</b>
<b>1.3 Virtalenkit.....</b>	<b>55</b>
<b>1.4 Oskilloskooppi.....</b>	<b>55</b>
<b>1.5 Mittausten suoritus .....</b>	<b>56</b>
<b>1.5.1 Summavirta .....</b>	<b>57</b>
<b>1.5.2 Akselin maadoitusvirta.....</b>	<b>57</b>
<b>1.5.3 Kiertovirta.....</b>	<b>59</b>
<b>1.5.4 Akselijännite.....</b>	<b>60</b>
<b>2. Tulkinta ja toimenpiteet .....</b>	<b>61</b>
<b>2.1 Tulosten tulkinta.....</b>	<b>61</b>
<b>2.2 Laakerivirtojen pienentäminen.....</b>	<b>62</b>

## 1. Laakerivirran ja akselijännitteen mittaust

### 1.1 Tarkoitus ja perustiedot

Tämä ohje on tarkoitettu Tervasaaren yksikön automaatiokunnossapidon käyttöön laakerivirran ja akselijännitteen mittausta varten oikosulkumoottorista. Ohje käsittelee mittauksia Tervasaareen vuonna 2013 hankitulla laitteistolla. Mittauksien ja tulosten analysoinnin perustietoina on oltava oskilloskoopin käytön osaaminen, PSK 7708 standardin tunteminen sekä ABB:n teknisen oppaan nro 5 sisäistäminen.

Laakerivirrat ovat yleinen ongelma taajuusmuuttajakäyttöisissä oikosulkumoottoreissa ja se aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia laakerien kuluessa loppuun huomattavasti normaalia nopeammin. Kuvassa 1 on tyypillinen rullalaakerin kehän kuvio, joka syntyy laakerivirtojen vaikutuksesta.



KUVA 1. Laakerivirran takia tuhoutunut rullalaakerin kehä.

## 1.2 Mittalaitteet

Mittalaitteina Tervasaaren automaatiokunnossapidolla on

- **Agilent DSO1102B oskilloskooppi**
- **Rogowski virtalenkki 400 mm / 50 mV/A**
- **Rogowski virtalenkki 1500 mm / 50 mV/A**
- **Rogowski virtalenkki 1900 mm / 50 mV/A**

## 1.3 Virtalenkit

Virtalenkit säilytetään niille varatuissa koteloidissa ja pidempiaikaisessa säilytyksessä niiden vahvistimista otetaan paristot pois. Virtalenkki otetaan käyttöön siten, että lenkin punainen mittapää asetetaan mitattavan johtimen (tai akselin) ympärille ja lenkin pää kiristetään kiinni kantaan. Vahvistimen liittimestä kytketään mittasignaali oskilloskooppiin virtalennkkikoteloon kuuluvalla koaksiaalikaapelilla. Vahvistimeen asetetaan paristot paikalleen ja painetaan vahvistin päälle (vihreä valo osoittaa paristojen olevan kunnossa).

Rogowski virtalenkit mittaavat vain vaihtovirtaa, eli mahdolliset tasajännitekomponentit jäävät pois näkyvistä. Käytössä olevien mallien mittausalue on noin 300 mA...120 A. Lenkit mittaavat kuitenkin myös alle 300 mA virtoja, mutta tarkkuus kärsii, koska pienellä virralla ympäristön häiriöiden osuus kasvaa.

## 1.4 Oskilloskooppi

Oskilloskooppia on käsiteltävä varovaisuutta noudattaen, koska se ei ole iskunkestävää mallia. Sitä ei myöskään saa käyttää kosteissa olosuhteissa. **Virtalennkkejä käytettäessä on huomioitava, että mittapään vaimennus asetetaan 1x. Oskilloskoopin oman jännitemittapään kanssa vahvistus on asetettava 10x.**

Tärkeä asia oskilloskoopissa käytettäessä on näytteenottoväli. Tämä muuttuu aika-akselin asettelun mukaan, sillä laitteen puskurimuisti on rajallinen. Mitä pienempi aika/ruutu-asetus oskilloskoopissa on, sitä suurempi on näytteenottotaajuus. Näytteenottotaajuuden saa esille painamalla ”Horiz” nappia. Näytteenottotaajuudesta voidaan laskea näytteenottoväli seuraavasti

$$t_s = \frac{1}{f_s}$$

jossa

$t_s$  = näytteenottoväli (s)

$f_s$  = näytteenottotaajuus (Sa/s)

Jos oskilloskooppi näyttää näytteenottotaajuudeksi esimerkiksi 500kSa/s, lasketaan näytteenottoväli

$$t_s = \frac{1}{500 \text{ kSa/s}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 2 \text{ } \mu\text{s}$$

Näytteenottoväli on oleellinen asia etenkin akselijännitteen mittauksessa, koska kipinäpurkaukset laakereissa ovat hyvin lyhytkestoisia, yleensä luokkaa 100 ns. Tällöin oskilloskoopin näytteenottotaajuudeksi on asetettava arvo, jolla laite ottaa vähintään 5 näytettä sadassa nanosekunnissa. Näytteenottotaajuus olisi siis oltava **50 MSa/s**. Näytteitä kannattaa kuitenkin ottaa useammalla eri taajuudella.

Oskilloskoopilla voidaan tallentaa näytteet joko .wfm tiedostomuodossa, tai suoraan kuvina .png muodossa. Waveform tiedostomuoto on Agilentin oma muoto, joka voidaan avata esimerkiksi wfm-reader ohjelmalla. Ohjelma itsessään on melko epäkäytännöllinen, mutta sillä voidaan tallentaa tiedosto .csv muotoon, jonka saa Excelillä auki. Tällöin tallennetulle datalle voidaan tehdä FFT-analyysi, eli tarkastella näytettä taajuustasossa. Taajuustason tarkastelu voi olla kätevää esimerkiksi mitattaessa toisella kanavalla moottorin syöttökaapeleiden summavirtaa ja toisella moottorin akselin maadoitusvirtaa. Tämän jälkeen tutkitaan esiintyykö näissä samoja taajuuksia. Jos samoja taajuuksia esiintyy, voidaan olettaa summavirran muodostavan suoraan akselin maadoitusvirran. Tällöin on ryhdyttävä toimenpiteisiin akselin maadoitusvirran pienentämiseksi.

## 1.5 Mittausten suoritus

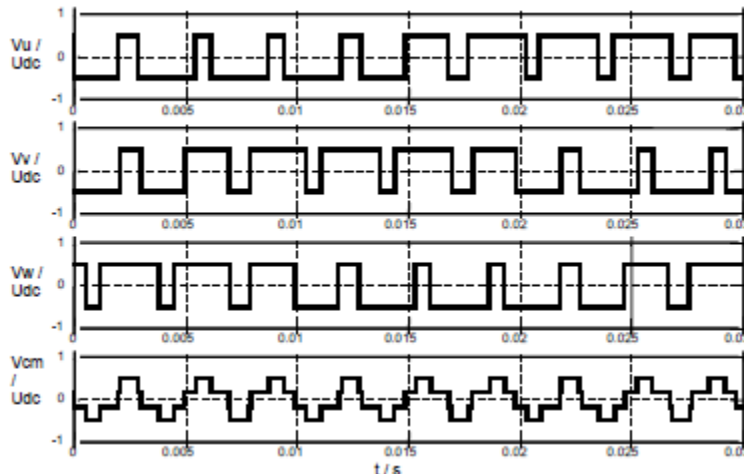
Tässä on selostettu PSK standardin 7708 mukaiset mittaukset, eli akselin maadoitusvirta, kiertovirta ja akselijännite. Lisäksi on selostettu standardin ulkopuolinen, mutta informatiivinen summavirran mittaus. Kohteelle voidaan myös suorittaa tarvittaessa lisämaadoitusten virran mittaus, vaihdelaatikosta ulos lähtevän virran mittaus yms.

Mittauksissa kannattaa käyttää molempia oskilloskoopin kanavia hyödyksi joka kerta. Kun mitataan akselin maadoitusvirtaa, kannattaa toisella kanavalla mitata syöttökaapeleiden summavirtaa. Tuloksista voidaan monesti nähdä summavirran muodostavan saman taajuisen akselin maadoitusvirran.



### 1.5.1 Summavirta

Summavirta aiheuttaa laakerivirtojen syntymisen, koska moottorin rungon potentiaali ei pysy nollassa taajuusmuuttajan aiheuttaman yhteismuotoisen jännitteen (common mode voltage) takia. Taajuusmuuttajassa on yleisesti vain kaksi DC-jännitetasoa, joista muodostetaan kolmivaiheinen vaihtojännite kytkinkomponenteilla. Näin ollen kolmen vaiheen yhteenlaskettu jännite ei voi milloinkaan olla tasan nolla, vaan se muodostuu oheisen kuvan mukaiseksi yhteismuotoiseksi jännitteeksi.



KUVA 2. Yhteismuotoisen jännitteen syntyminen (Kuva: PSK 7708 2004).

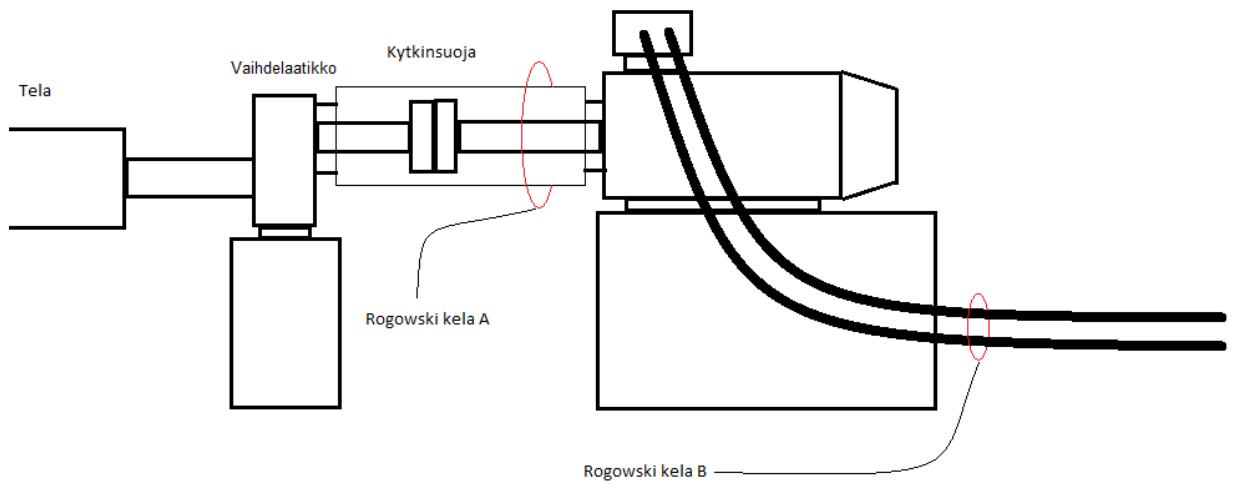
Summavirta voidaan mitata asettamalla Rogowskin virtalenkki kaikkien moottorin syöttökaapeleiden ympärille moottorin käydessä nimelliskuormituksellaan (tai kuormalla, jolla se suurimmaksi osaksi käy).

### 1.5.2 Akselin maadoitusvirta

Akselin maadoitusvirta tarkoittaa moottorin akselista kuormakoneeseen päin pyrkivää virtaa. Tällainen virta muodostuu, jos kuormakoneella on pienempi- tai lähes sama-impedanssinen reitti taajuusmuuttajan maapotentiaaliin, kuin moottorin rungossa. Virta on haitallinen sekä moottorille että kuormakoneelle. Moottorissa se kulkee D-pään laakerin läpi ja esimerkiksi vaihdelaatikossa joko vaihdelaatikon hampaiden tai laakereiden läpi.

Akselin maadoitusvirta mitataan asettamalla Rogowskin lenkki moottorin akselin ympärille (kuva 3, lenkki A) moottorin käydessä normaalilla kuormituksella. Samalla kannattaa mitata myös moottorin syöttökaapeleiden summavirta (kuva 3, lenkki B).

**HUOM! Mittaa akselin maadoitusvirta aina kytkinsuojan ympäriltä, ei koskaan paljaan pyörivän akselin ympäriltä!**



KUVA 3. Akselin maadoitusvirran ja summavirran mittauksen periaatekuva.

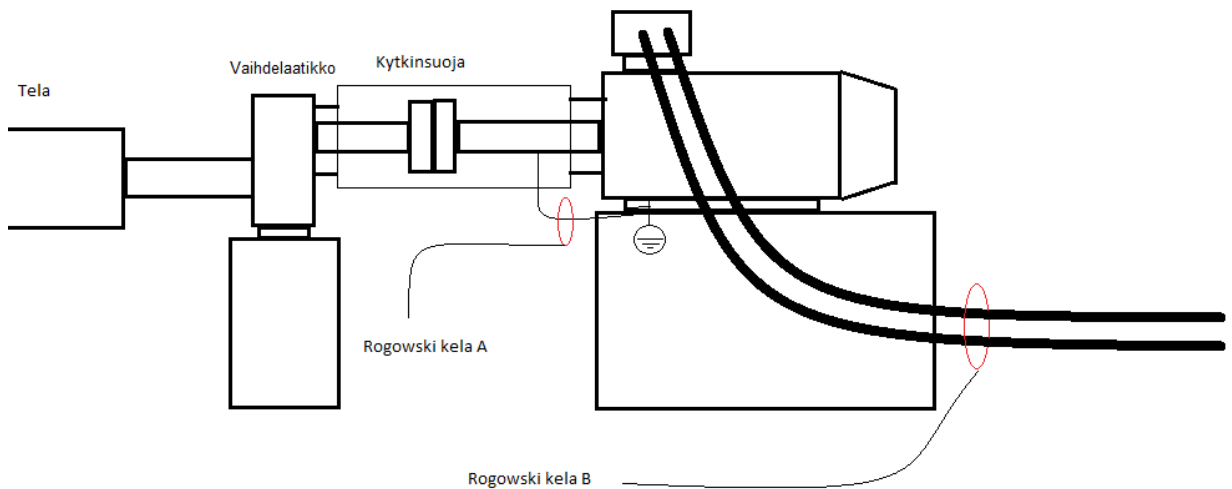
### 1.5.3 Kiertovirta

Kiertovirta tarkoittaa moottorin sisällä laakereiden kautta kiertävää virtaa. Kiertovirta voi kulkea myös kuormakoneen kautta, jos se on moottorin kanssa samalla johtavalla alustalla. Kiertovirtaa ei voida suoraan mitata käytössä olevilla mittalaitteilla, mutta se voidaan mitata epäsuorasti oikosulkemalla normaalikuormituksella käyvän moottorin akseli moottorin runkoon ja mittaamalla oikosulkulenkin virta.

Oikosulkulenkinä tulee käyttää mahdollisimman pienen ylimenovastuksen omaavaa materiaalia. Hyväksi havaittu materiaali on monisäikeinen, suuri poikkipintainen kupari-kaapeli. Kiertovirta mitataan kuvan 4 mukaisesti.

**HUOM 1! Jos moottorin akselijännite on erityisen suuri (yli 10  $V_{rms}$ ) ja moottori on erittäin suuri (yli 1 MW), mittaa kiertovirta ensin sunttivastuksen avulla! Kiertovirta voi olla pahimmillaan satoja ampeereita!**

**HUOM 2! Ennen oikosulkulenkin painamista akseliin, tarkista esim. strobovalolla, ettei akselilla ole kiilaa tai kiilauraa näkyvissä!**



KUVA 4. Kiertovirran ja summavirran mittauksen periaatekuva.

#### 1.5.4 Akselijännite

Moottorin akselijännite indusoituu akseliin yhteismuotoisesta jännitteestä moottorin hajakapasitanssien kautta. Jännite on taajuusmuuttajakäyttöisissä moottoreissa yleensä erittäin suuritaajuista. Akselijännitteen ollessa riittävän suuri, moottorin laakerin rasvakalvon läpilyöntijännite ylittyy ja laakerissa aiheutuu kipinöintiä, joka työstää laakerime-tallia. Kun laakeri on kipinätyöstynyt riittävästi, alkaa laakeri työstää mekaanisesti itse-ään. Tällöin laakeri kuluu huomattavan paljon nopeammin loppuun, kuin normaalissa käyttötilanteessa.

Akselijännite mitataan oskilloskoopin jännitemittapäällä käyttämällä kiertovirran mit-tauksesta tuttua oikosulkulenkkiä, jolla tuodaan jännite mittapäähän. Mittapäähän tuo-daan lisäksi maapotentiaali toisella lenkillä moottorin rungosta lisämaadoituksen kyt-kentäkohdasta, jos sellaista on.

**HUOM! Ennen oikosulkulenkin painamista akseliin, tarkista esim. strobovalolla, ettei akselilla ole kiilaa tai kiilauraa näky-vissä!**

## 2. Tulkinta ja toimenpiteet

### 2.1 Tulosten tulkinta

Mittausten tulkinta ei ole täysin yksiselitteistä, koska laakerivirrat ovat aina tapauskohtaisia. Kuitenkin aina kannattaa lähteä liikkeelle siitä, että selvitetään minkä tyyppinen laakerivirta kohteessa on ja onko virrat tai jännitteet niin suuria, että on syytä ryhtyä toimenpiteisiin (ks. PSK 7708).

Laakerivirtoja on useaa tyyppiä:

- **EDM-laakerivirta**
- **Kapasitiivinen laakerivirta**
- **Kiertävä suuritaajuinen laakerivirta**
- **Roottorin maadoitusvirta**

Käytössä olevilla mittalaitteilla saa helposti selville onko laakerivirran tyyppi roottorin maadoitusvirta, vai joku jäljelle jäävistä vaihtoehtoista. Jäljelle jääviä vaihtoehtoja on vaikea eritellä näillä laitteilla. Akselijännitteestä on kuitenkin mahdollista päätellä esiintyykö laakereissa kipinöintiä. Jos kipinöintiä esiintyy, voidaan kapasitiivinen laakerivirta sulkea pois. Jos moottorin toisessa päässä on eristetty laakeri tai laakerikilpi, voidaan myös kiertävä laakerivirta sulkea melko varmasti pois (eristeen läpilyöntikestoisuus voi jossain tapauksissa ylittyä).

## 2.2 Laakerivirtojen pienentäminen


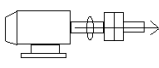
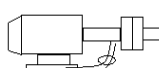
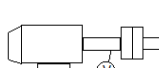
Kun laakerivirran tyyppi on saatu selville ja virran tai jännitteen suuruus on sitä luokkaa, että käytölle voi aiheutua vaaraa, on ryhdyttävä toimenpiteisiin. Seuraavassa taulukossa on esitetty toimenpiteiden vaikutus laakerivirran tyyppin mukaan.

TAULUKKO 1. (Särkimäki V., Radio Frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors, doctoral dissertation, LUT, 2009.)

Toimenpide	Laakerivirran tyyppi		
	EDM-virrat	Kiertävät virrat	Akselin maadoitusvirrat
Akselin maadoitus (hiili, Aegis rengas) Eristetyt tai keraamiset laakerit	Vaaditaan pieni impedanssi	Vaaditaan pieni impedanssi	Voi jopa pahentaa ongelmaa
	Vaatii, että molemmat laakerit ja kuorma eristetään	Toinen pää pitää eristää	Molemmat päät on eristettävä
Moottorin lisämaadoitus ja/tai suojatut moottorikaapelit Taajuusmuuttajan lähtösuotimet	Ei toimi	Voi jopa pahentaa ongelmaa	Toimii
	Toimii, jos suodin poistaa yhteismuotoista jännitettä	Toimii	Toimii
Eristetty kytkin moottorin ja kuormalaitteen välille	Toimii kuormaloneelle	Ei toimi, virta kiertää moottorin sisällä	Toimii
Faradayn häkki staattorin ja roottorin välille	Toimii	Ei toimi	Toimii
Taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden laskeminen	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa
CM-jännitettä optimoiva taajuusmuuttajan modulointi	Toimii, jos poistaa yhteismuotoista jännitettä	Toimii, jos poistaa yhteismuotoista jännitettä	Toimii, jos poistaa yhteismuotoista jännitettä
Staattorin urien vuoraaaminen johtavilla liuskoilla	Ei toimi	Toimii	Vaatii kunnollisen maadoituksen
Taajuusmuuttajan välipiirin jännitetasojen lisääminen	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa

Paperikoneen linjakäytöissä esiintyy usein akselin maadoitusvirtoja, joista voi olla vaikeaa päästä kokonaan eroon. Eristetty kytkin poistaa telaan tai vaihdelaatikkoon menevän virran, mutta ongelma voi siirtyä moottorin laakereihin, jolloin tarvitaan akselin maadoitusta. Lisämaadoitukset yleensä pienentävät akselin maadoitusvirtaa, mutta eivät poista sitä kokonaan, ellei kaapelointimatka taajuusmuuttajalle ole erittäin lyhyt. Lisäksi lisämaadoitus pyöreällä kaapelilla ei yleensä poista kaikkein korkeimpia taajuuksia virranahtaumailmiön takia. Tällöin maadoittamiseen tarvitaan lattakaapelia, jossa virranahtaumailmiötä ei pääse juuri syntymään.

## Liite 2. Laakerivirtojen mittauspöytäkirja

	 <b>UPM</b> The Biofore Company		<b>Laakerivirtamittauspöytäkirja UPM Tervasaari</b>	Kohde: _____
		Päivämäärä		
		Mittauksen suorittaja		
		Summavirta syöttökaapeleista <i>I rms (A)</i>		
	<b>PSK 7708 mukaiset raja-arvot</b>	Summavirta syöttökaapeleista <i>I peak (A)</i>		
	<b>Tehollisarvo</b> < 20 mA 20...50 mA > 50 mA	<b>Haitallisuus</b> Ei vaikuta merkittävästi Voi vaikuttaa käyttöikään Vaikuttaa	Akselin maadoitusvirta <i>I rms (A)</i>	
	<b>Huippuarvo</b> <i>I peak/A</i> < 1 A 1...2 A > 2 A	<b>Haitallisuus</b> Ei vaikuta merkittävästi Voi vaikuttaa käyttöikään Vaikuttaa merkittävästi	Akselin maadoitusvirta <i>I peak (A)</i>	
	<b>Tehollisarvo</b> <i>I rms/mA</i> < 20 mA 20...50 mA > 50 mA	<b>Haitallisuus</b> Ei vaikuta merkittävästi Voi vaikuttaa käyttöikään Vaikuttaa merkittävästi	Kiertovirta <i>I rms (A)</i>	
	<b>Huippuarvo</b> <i>I peak/A</i> < 1 A 1...2 A > 2 A	<b>Haitallisuus</b> Ei vaikuta merkittävästi Voi vaikuttaa käyttöikään Vaikuttaa merkittävästi	Kiertovirta <i>I peak (A)</i>	
	<b>Tasajännite</b> <i>U dc/V</i> < 0,5 V 0,5...0,7 V > 0,7 V	<b>Haitallisuus</b> Ei haitallinen Voi olla haitallinen Vaarallisen korkea arvo	Akselijännite <i>Udc (V)</i>	
	<b>Tehollisarvo</b> <i>U rms/V</i> < 0,3 V 0,3...2 V > 2 V	<b>Haitallisuus</b> Ei haitallinen Voi olla haitallinen Vaarallisen korkea arvo	Akselijännite <i>U- rms (V)</i>	
	<b>Huippuarvo</b> <i>U peak/V</i> < 3 V 3...10 V > 10 V	<b>Haitallisuus</b> Ei haitallinen Voi olla haitallinen Vaarallisen korkea arvo	Akselijännite <i>U- peak (V)</i>	
			Lisämaadoituksen virta <i>I rms (A)</i>	
			Lisämaadoituksen virta <i>I peak (A)</i>	
			Telaan menevä virta <i>I rms (A)</i>	
			Telaan menevä virta <i>I peak (A)</i>	
			<b>Huomioita</b>	

## **Laakerivirtamittaukset Kaipola PK4 keskitela 11.11.2013**

---

### **1. Mittauksien suorittajat Tervasaaresta**

Joni Järvi, insinööriyöntekijä  
Vesa Laapas, automaatiotyönjohtaja  
Pentti Huovilainen, automaatioasentaja

### **2. Mittauksissa mukana Jokilaaksosta**

Alpo Pohjalainen  
Petri Laakso

### **3. Kohteen tausta**

Kohteessa oli havaittu vaihdelaatikon hampaiden kulumaa, joka oli diagnosoitu virran aiheuttamaksi. Moventas Oy suoritti kohteeseen vuotovirtakartoituksen, jonka perusteella kohteeseen asennettiin lisämaadoitus moottorin ja vaihdelaatikon välille 55 mm leveällä punotulla kuparisella lattakaapelilla. Lisäksi moottorin akseli maadoitettiin tasa-virtamoottorin hiilellä. Toimenpiteiden jälkeen Moventaksen suorittamien mittausten mukaan kohteessa on edelleen ongelma vaihdelaatikon läpi kulkevan virran suhteen.

### **4. Käyttämämme mittalaitteet**

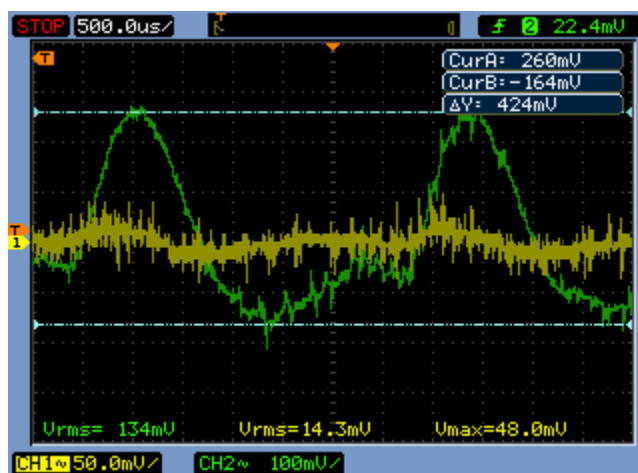
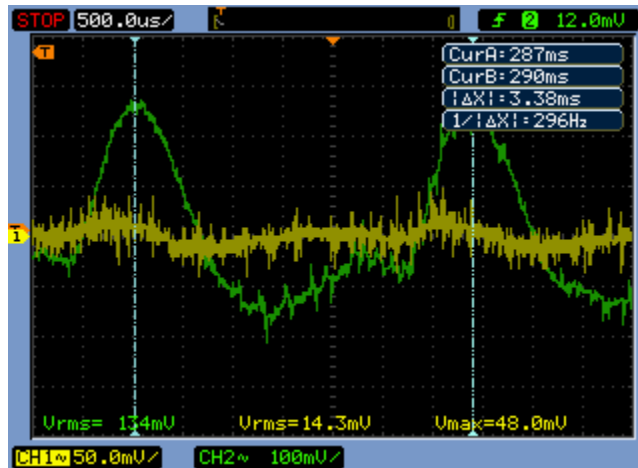
Agilent DSO1102B oskilloskooppi  
Rogowski virtalenkki 400 mm / 50mV/A  
Rogowski virtalenkki 1500 mm / 50mV/A



## 5. Tervasaaren yksikön mittaukset

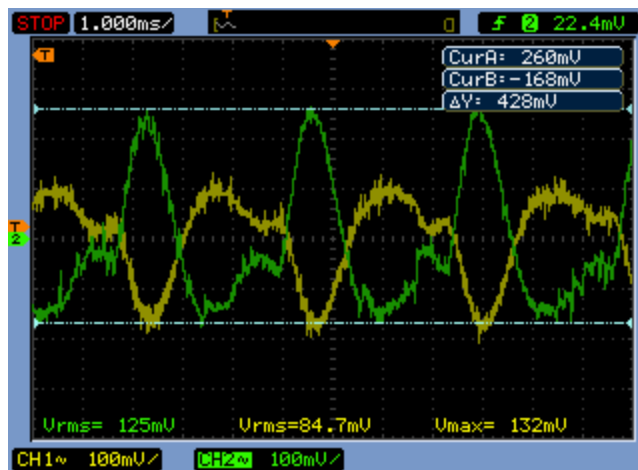
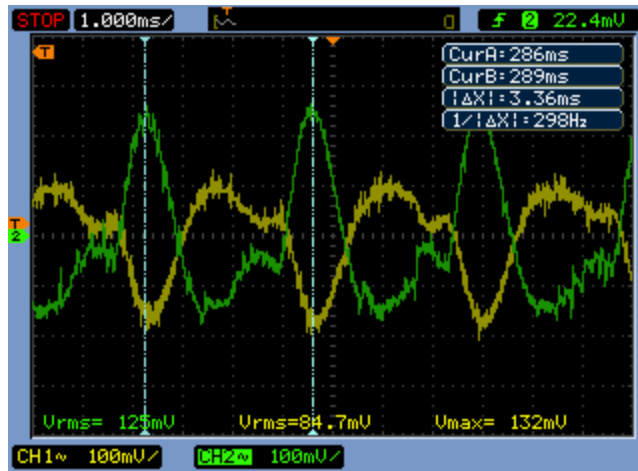
### 5.1 Alkutilanne

Mittasimme kohteesta ensin ilman mitään toimenpiteitä syöttökaapeleiden summavirran ja moottorin akselista vaihdelaatikkoon päin lähtevän virran. Kuvissa vihreä käyrä on kaapeleiden summavirta ja keltainen akselivirta.



Havaitaan, että summavirran taajuus on 300 Hz. Jos kyseisen kohteen taajuusmuuttajassa on 12-pulssisilta tasasuuntaajassa, voisi tämä taajuus olla tasasuuntaussillan aiheuttama DC-välipiirin keskipisteen huojuunta. Oskilloskoopin laskema RMS arvo summavirralle on 2,68 A, kun Rogowskin kelan herkkyys on 50mV/A. Peak to peak arvo on 8,48 A. Akselivirran vastaavat arvot ovat RMS 286 mA ja peak to peak 960 mA.

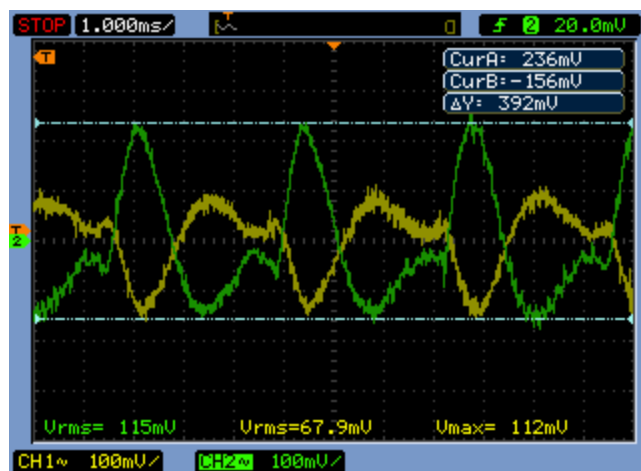
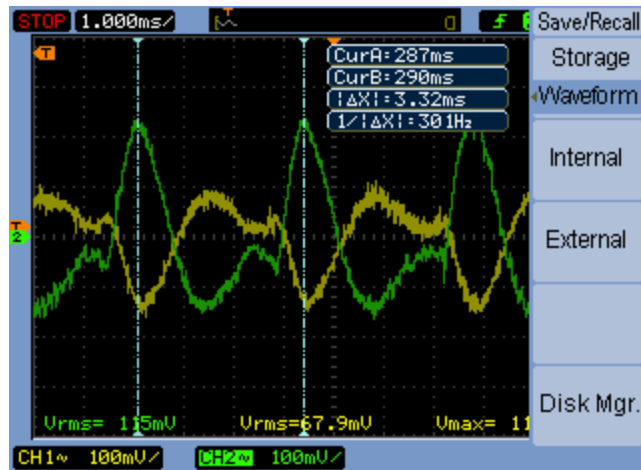
Seuraavaksi siirsimme pitkän virtalенkin kytkinsuojan ympäriltä moottorin ja vaihdelaatikon välisiin potentiaaalintasauskaapeleihin.



Kuvissa on vihreä käyrä edelleen syöttökaapeleiden summavirta ja keltainen potentiaaalintasauskaapeleiden virta. Havaitaan, että virrat ovat täysin samanmuotoisia ja -taajuisia, joten osa summavirrasta maadoittuu potentiaaalintasausta pitkin. Maadoitusvirran RMS arvo on 1,7 A ja peak to peak arvo 2,64 A.

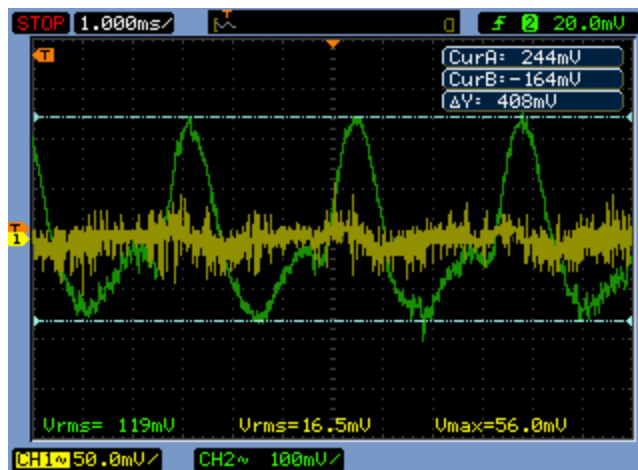
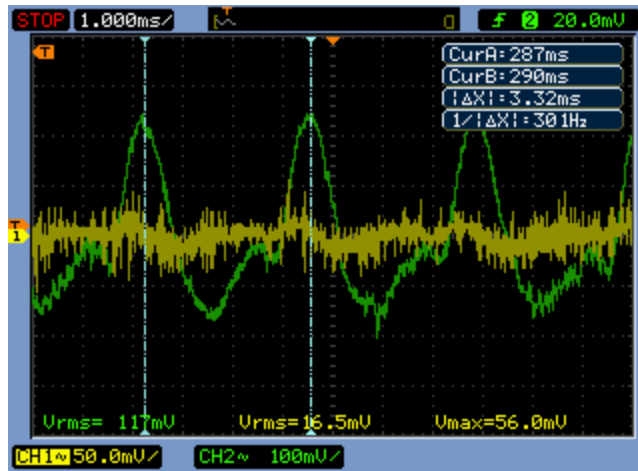
## 5.2 Maadoitus viereiseen moottoriin

Mittausten tarkoituksena oli kokeilla erilaisten lähettyviltä löytyvien maapotentiaalien vaikutusta akselissa kulkevaan virtaan. Ensimmäisenä liitettiin maadoitus 120 mm<sup>2</sup> pyöreällä kuparilla tutkittavasta moottorista viereiseen moottoriin.



Kuvissa vihreä käyrä on syöttökaapeleiden summavirta ja keltainen potentiaalintasauskaapeleiden virta. Havaitaan summavirran pienentyneen hieman RMS arvon ollessa 2,3 A ja peak to peak arvon 7,84 A. Pienentyminen voi tuki johtua kuormituksen muutoksesta tai mittalaitteiden tarkkuudesta. Potentiaalintasauksen RMS virta on 1,36 A ja peak to peak 2,24 A. Havaitaan virran pienentyminen alkutilanteesta prosentuaalisesti jo sen verran, että voidaan olettaa osan virrasta maadoittuvan viereiseen moottoriin.

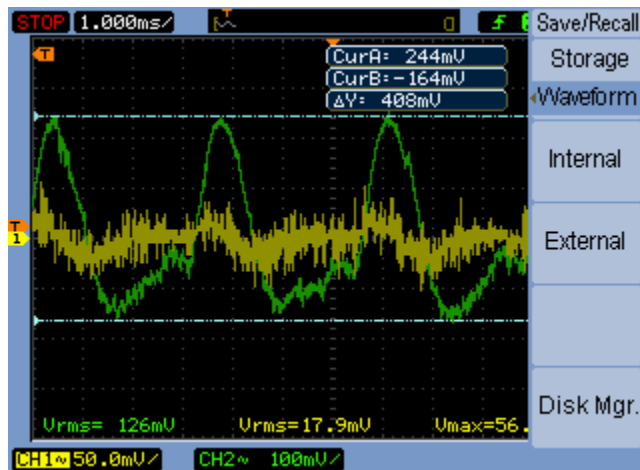
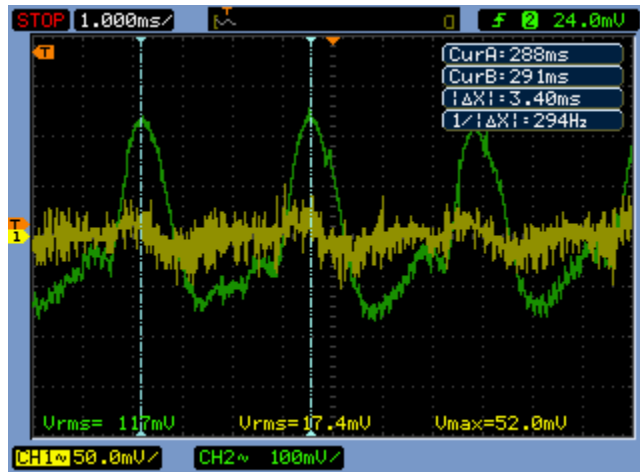
Seuraavaksi siirsimme pitkän virtalenkin jälleen kytkinsuojan ympärille akselivirtaa mitaamaan.



Akselivirran RMS arvo on 330 mA ja peak to peak 1,12 A. Akselivirta siis suureni hieman. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että pienin virta, jonka lenkki pystyy mittaamaan tarkasti on noin 300 mA ja näin pienellä virralla ulkopuoliset häiriöt vaikuttavat merkittävästi lenkin antamaan signaaliin. Virran pienentyminen voi siis selittyä häiriöiden muutoksella tilanteessa.

### 5.3 Maadoitus ilmastointikanavaan

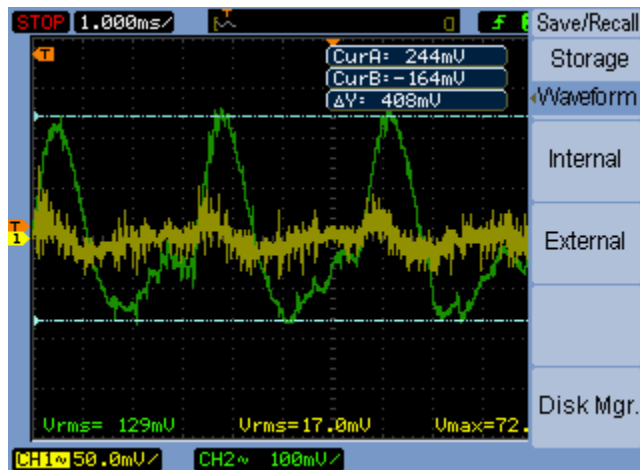
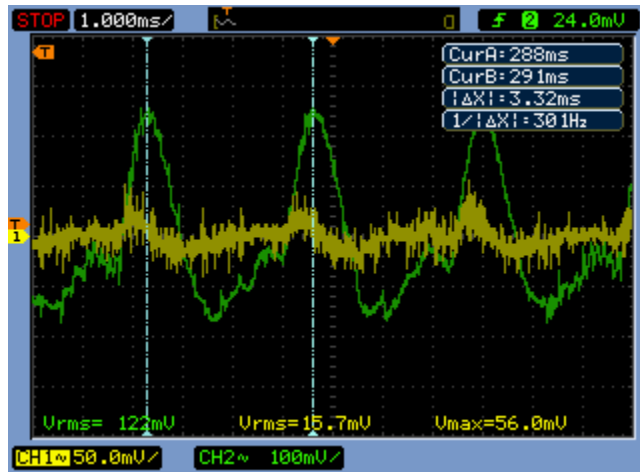
Seuraavaksi maadoitimme tutkittavan moottorin käyttöjen takana kulkevaan ilmastointikanavaan samalla kuparikaapelilla kuin aiemmassa tilanteessa.



Pitkä lenkki oli edelleen moottorin kytkinsuojan ympärillä. Summavirran RMS virta on ylemmän kuvan mukaan 2,34 A ja alemman kuvan mukaan 2,52 A. Virroissa on eroa, koska kuvat ovat muutaman millisekunnin eri kohdasta. Peak to peak arvo on 8,16 A. Summavirta on siis likimain sama kuin alkutilanteessa. Akselivirran RMS arvo on 360 mA ja peak to peak 1,12 A. Tässäkin tapauksessa näyttää siis, että akselivirta olisi suurentunut hieman.

## 5.4 Vaihdelaatikon maadoitus paperikoneen runkoon

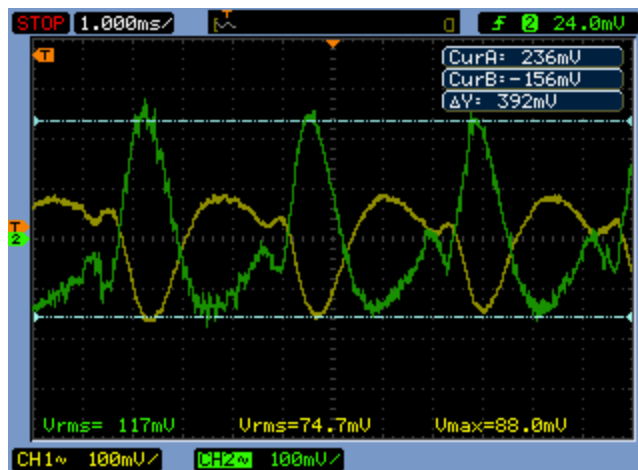
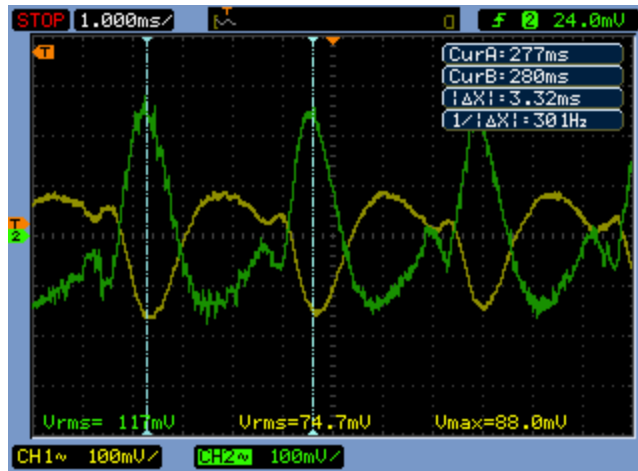
Maadoitimme edelleen samalla kuparikaapelilla käytön vaihdelaatikon yläpuolella kulkevaan paperikoneen runkopalkkiin.



Pitkä lenkki oli moottorin kytkinsuojan ympärillä. Summavirran RMS arvo tässä tilanteessa oli 2,44 A ja peak to peak arvo 8,16 A. Akselivirran RMS arvo oli ylemmän kuvan mukaan 314 mA ja alemman kuvan mukaan 340 mA. Peak to peak arvo oli ylemmässä 1,12 A ja alemmassa

1,44 A. Akselivirta siis näyttäisi tässäkin tilanteessa olevan hieman suurempi, kuin ilman lisämaadoituksia.

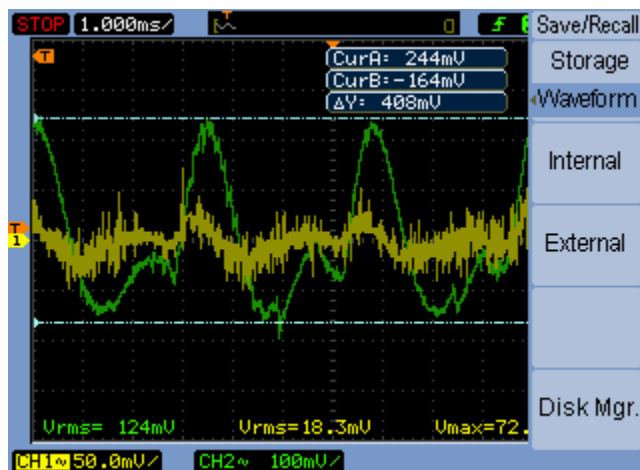
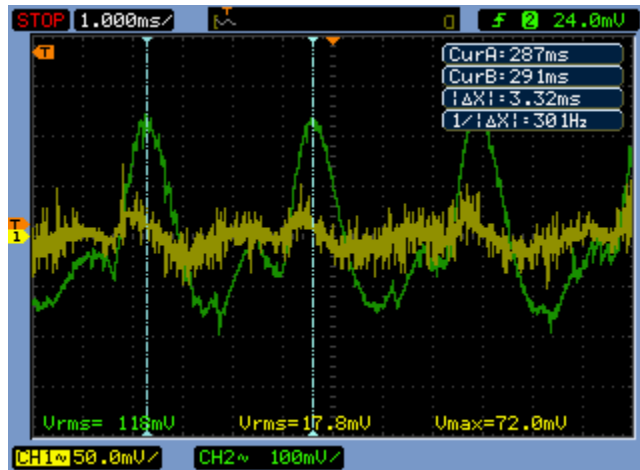
Siirsimme pitkän lenkin kytkinsuojan ympäriltä moottorin ja vaihdelaatikon välisten potentiaalintasauskaapeleiden ympärille.



Potentiaalintasauksen RMS virta oli 1,5 A ja peak to peak 1,76 A. Virta siis pieneni hieman lisämaadoittamattomaan tilanteeseen verrattuna. Tämä johtuu siitä, että nyt akselin kautta kulkevan virran reitin impedanssi on vielä pienempi, kuin moottorista muuta kautta maadoittuvan virran impedanssi. Vielä lisäksi olisi voinut kokeilla moottorin maadoittamista paperikoneen runkoon.

## 5.5 Hiilen lisämaadoitus kuparijohtimella

Kokeilimme mitä vaikutusta akselivirtaan on maadoittaa moottorin akseli suoraan kuparijohtimella moottorin runkoon. Käytimme 6 mm<sup>2</sup> monisäikeistä kuparia.

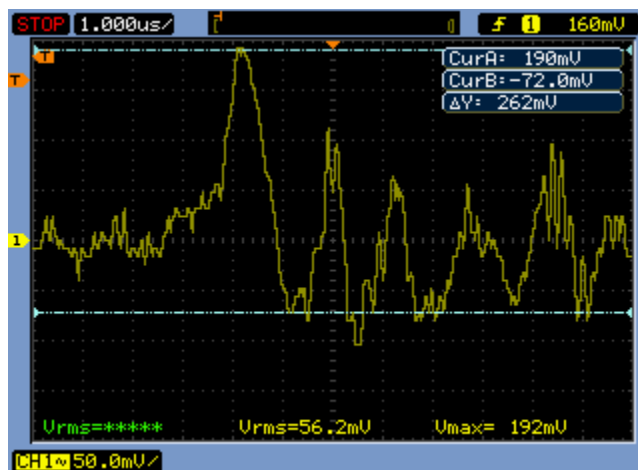
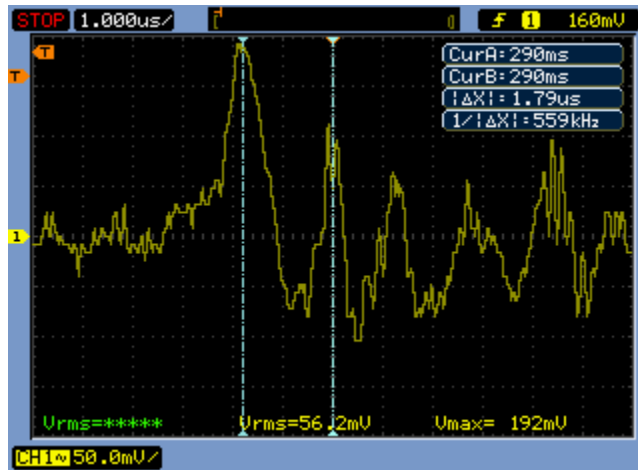


Summavirran suuruuteen akselin maadoittamisella ei näytä olevan vaikutusta. Akselivirran RMS arvo oli 360 mA ja peak to peak arvo 1,44 A. Akselivirta kasvoi siis hieman. Tämä johtuu siitä, että akselille moottorin rungosta tulevan virran reitin impedanssi on pienempi, kuin pelkällä hiilellä. Hiili voi siis tässä tapauksessa jopa lisätä akselista vaihdelaatikkoon kulkevaa virtaa.



## 5.6 Moottorin akselijännite

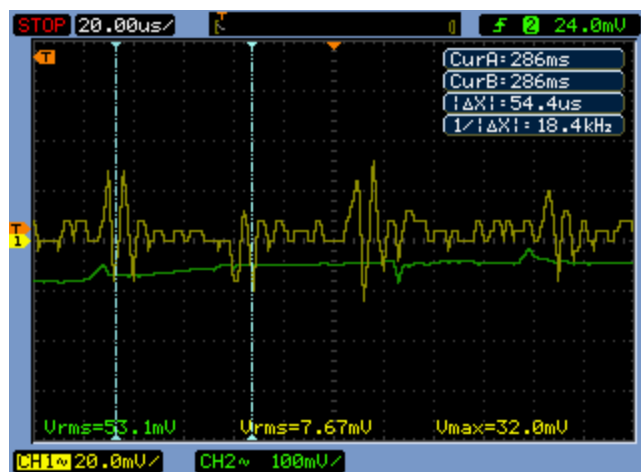
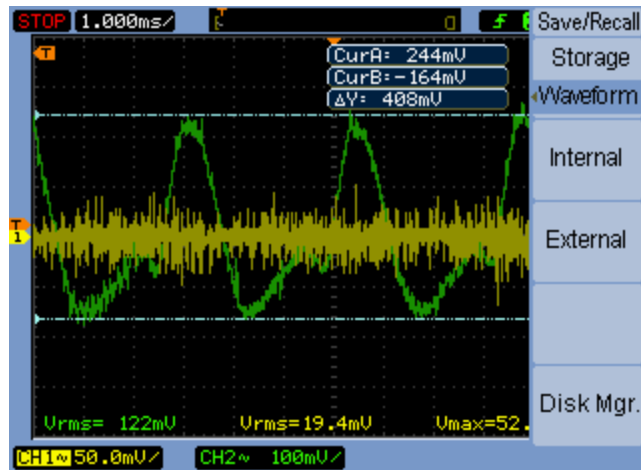
Mittasimme suoraan oskilloskoopin jännitemittapäällä moottorin akselijännitteen moottorin runkoon nähden.



Akselijännite on hyvin pieni, johtuen akselilla olevasta hiilestä. Näkyvä jännite on vain hiilen resistanssin ja ylimenovastuksen yli olevaa jännitettä.

## 5.7 Vaihdelaatikkoon sisään menevä virta

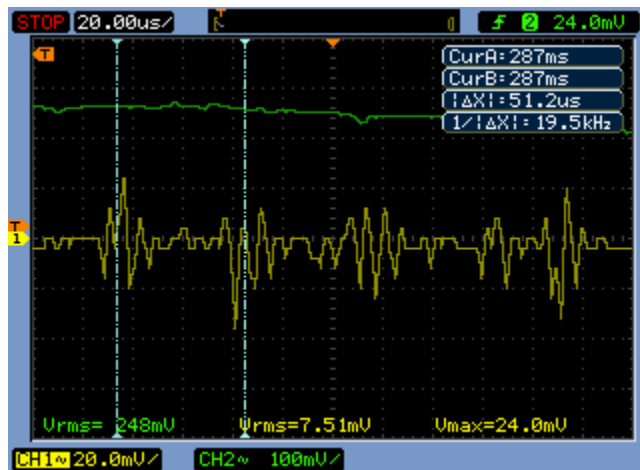
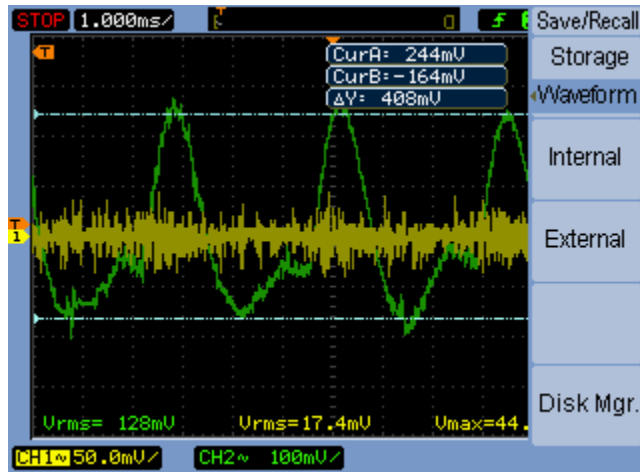
Viimeiseksi tutkimme, että tuleeko sama virta ulos vaihdelaatikosta, kuin sinne menee sisään. Emme saaneet näitä virtoja samaan kuvaan, koska toinen virtalenkki on vain 400 mm pitkä. Lyhyempi lenkki oli mittaamassa moottorin syöttökaapeleiden summavirtaa.



Ylemässä kuvassa nähdään, että sisään menevän virran RMS arvo oli 390 mA ja peak to peak 1,04 A. Arvot ovat siis lähes samat, kuin alkutilanteessa moottorin akselilta mitatut. Alemmassa kuvassa on lisäksi tarkemmalla aikaskaalalla näkyvissä virrassa olevat purskeet, joita tulee noin 18 kHz taajuudella.

## 5.8 Vaihdelaatikosta ulos tuleva virta

Siirsimme pitkän virtalenkin vaihdelaatikon ulostuloakselille mittaamaan telaan menevää virtaa. Lyhyt lenkki oli edelleen summavirtaa mittaamassa.



Virran RMS arvo oli 350 mA ja peak to peak arvo 880 mA. Virrat ovat siis hieman pienemmät, kuin sisään tulevat. Voidaan kuitenkin päätellä, että suurin osa virrasta menee paperikoneen telaan ja maadoittuu sieltä joltain kautta. Virta työstää siis vaihdelaatikon hampaita pahemmin kuin vaihdelaatikon laakereita.

## 5.8 Loppupäätelmät

Yhteenvedona voidaan todeta, että maadoittamalla voi olla vaikeaa saada riittävän pieni-impedanssista reittiä virralle takaisin taajuusmuuttajan maahan. Taajuusmuuttajalta voidaan vetää oma maadoitusköysi, mutta koska matka on pitkä, yli 100 m, pitäisi maadoitus olla toteutettu pyöreällä- ja lattakuparilla. Siltikin voi olla, että suuritaajuisille virroille ei löydy tätä kautta riittävän pientä impedanssia. Toimivin ratkaisu tässä tilanteessa lienee **eristetty kytkin** moottorin akselille. Tämä voi aiheuttaa akselijännitteen nousun, jolloin paremmin maadoittava hiili olisi hyvä moottorin laakereiden suojelemiseksi.